SUBJEKTIVE UNTERSUCHUNGEN AN DIGITALEN NACHBILDUNGEN VON SCHALLFELDERN AUS KONZERTSÄLEN

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von
Ulrich Eysholdt
aus Göttingen

Göttingen 1976

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41534921_0019

SUBJEKTIVE UNTERSUCHUNGEN AN DIGITALEN NACHBILDUNGEN VON SCHALLFELDERN AUS KONZERTSÄLEN

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von
Ulrich Eysholdt
aus Göttingen

Göttingen 1976

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

D 7

Referent: Prof. Dr. M.R. Schroeder

Korreferent: Prof. Dr. H.-U. Harten

Tag der mündlichen Prüfung: 4.11.1976

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Material und Methoden	4
2.1. Digitale Schallfeldsynthese	4
2.2. Durchführung der digitalen Schallfeldsynthese	6
2.3. Einsatz des Rechners zur digitalen Schallfeldsynthese	1o
2.3.1. Beschreibung der Rechenanlage und ihrer Peripherie	1o
2.3.2. Ein- und Ausgabe akustischer Signale	1o
2.3.3. Ausführung der Rechnungen	12
2.4. Subjektive Beurteilung	13
2.4.1. Durchführung der Hörvergleiche	13
2.4.2. Auswertung der Hörvergleiche	14
3. Einzeluntersuchungen zu den Parametern	16
3.1. Veränderung der Lautstärke	16
3.2. Variation der Nachhallzeit	21
3.2.1. Modifizierung der Impulsantworten	21
3.2.2. Variation der Nachhallzeit bei konstanter "early decay time"	24
3.2.3. Variation der "early decay time"	29
3.3. Variation des interauralen Korrelationsgrades	32
3.3.1. Erstellung der Schallfelder	32
3.3.2. Hörvergleiche (1. Hörreihe)	36
3.3.3. Hörvergleichsreihe zum Korrelationsgrad (2. Hörreihe)	43
3.3.4. Hörvergleichsreihe zum Korrelationsgrad (3. Hörreihe)	49

Seite

4. Diskussion 54

5. Zusammenfassung und Schluß 58

6. Literaturverzeichnis 6o

1. Einleitung

Die raumakustischen Untersuchungen der letzten Jahre konzentrierten sich besonders auf das Problem, welche Zusammenhänge zwischen dem subjektiven Höreindruck in einem Konzertsaal und meßbaren physikalischen Größen bestehen. Diese Parameter sind in großer Zahl definiert worden, sie können geometrischer und akustischer Natur sein. Übersichten finden sich bei CREMER (1961), KÜRER (1969) und REICHARDT (197o). Es wurde immer wieder versucht, die Zahl der Parameter auf wenige subjektiv relevante zu beschränken (GOTTLOB, 1973). Eine Sichtung und kritische Auswahl der Parameter gibt CREMER (1975).

Das Schallfeld an einem Hörerplatz unterliegt umfangreichen Einflüssen, von denen nur einige (geometrische und physikalische Eigenschaften) auf den Saal zurückzuführen sind, andere dagegen nicht (Aufstellung und Spielweise des Orchesters, Musikstil, Störgeräusche aus dem Publikum). Obwohl in dem Schallfeld die gesamte akustische Information enthalten ist, gehen in seine Beurteilung auch optische Eindrücke und Vorurteile ein ("Ruf" eines Saales; CREMER, 1961).

Die Untersuchung der Akustik von Konzertsälen wurde daher in jüngster Zeit mit dem Aufnahmeverfahren der kopfbezüglichen Stereophonie (DAMASKE, WAGENER, 1969; DAMASKE, MELLERT, 1969; WILKENS, 1972; MELLERT, 1972 u. 1975) in ein Labor verlegt (SIEBRASSE, 1973; GOTTLOB, 1973; WILKENS, 1975). Die kopfbezügliche Stereophonie ist die gegenwärtig beste Methode, um ein Schallfeld originalgetreu zu reproduzieren. Auf diese Weise können Schallfelder aus verschiedenen Konzertsälen parallel beurteilt werden. Die Schwierigkeit des mangelhaften akustischen Gedächtnisses sowie die von störenden optischen Eindrücken wird damit umgangen.

Als Ergebnis derartiger Untersuchungen wurden von SIEBRASSE (1973) vier verschiedene unabhängige Beurteilungskriterien

beschrieben, deren erstes etwa die Übereinstimmung zwischen den Hörern repräsentiert. Die übrigen drei Kriterien wurden als individuelle Geschmacksfaktoren gedeutet. In ähnlicher Weise fand WILKENS (1975), daß die subjektive Beurteilung seiner Aufnahmen aus Konzertsälen drei Komponenten aufwies, die er als Stärkegrad und Ausdehnung der Schallquelle, Deutlichkeit und Klangfarbe des Gesamtklanges identifizierte.

Physikalische Parameter zur Messung solcher Beurteilungskriterien sind bislang nur teilweise bekannt. Als Parameter zur Erfassung des subjektiven Raumeindrucks geben REICHARDT und LEHMANN (1976) das Raumeindrucksmaß an. Zur Beschreibung der Deutlichkeit bzw. der Durchsichtigkeit dient nach ABDEL ALIM (1973) das Klarheitsmaß C. Die subjektive Diffusität eines Schallfeldes wird nach DAMASKE (1967/68; 1972) durch den Korrelationsgrad K gemessen.

Die lückenhafte Kenntnis geeigneter physikalischer Parameter zur Erfassung des subjektiven Höreindrucks hat mehrere Gründe. Bei Aufnahmen aus verschiedenen Konzertsälen ändert sich i.a. der gesamte Parametersatz (SCHROEDER et al., 1975), so daß der Einfluß des einzelnen Parameters nicht isoliert untersucht werden kann. Weiterhin ist es schwierig, durch semantische Fragestellungen die Aufmerksamkeit des Hörers nur auf eine Schallfeldkomponente zu richten. Daher werden die oben genannten Parameter einzeln in synthetischen Schallfeldern studiert, wobei unter Konstanthaltung vieler objektiver Kriterien einige Parameter variiert werden. Auf diese herkömmliche Methode der Schallfeldnachbildung sowie ihre Vor- und Nachteile soll später noch eingegangen werden.

In der vorliegenden Arbeit soll eine neue Methode vorgestellt werden, die die Schallfeldnachbildung auf einem Digitalrechner vornimmt. Im Gegensatz zur erwähnten analogen Schallfeldnachbildung soll dies Verfahren im folgenden als digitale Schallfeldsynthese bezeichnet werden.

Mit Hilfe der digitalen Schallfeldsynthese sollen einige der genannten Parameter und ihr Einfluß auf die Hörsamkeit von Schallfeldern untersucht werden. Im Mittelpunkt stehen dabei die Parameter, die bei früheren Untersuchungen als wichtig erkannt wurden. Hierzu zählen die Nachhallzeit T, das Verhältnis von früh zu spät eintreffender Energie (beschrieben durch das Klarheitsmaß C) und der interaurale Korrelationsgrad K.

2. Material und Methoden

2.1. Digitale Schallfeldsynthese

Das Schallfeld an einem Hörerplatz in einem Konzertsaal läßt sich unter der Annahme von N punktförmigen Schallquellen durch die Gleichungen

$$s_L(t) = \sum_{i=1}^{N} \int_{-\infty}^{+\infty} m_i(t') \cdot h_{iL}(t-t')\, dt' \qquad (1)$$

$$s_R(t) = \sum_{i=1}^{N} \int_{-\infty}^{+\infty} m_i(t') \cdot h_{iR}(t-t')\, dt'$$

beschreiben. Hierin sind $s_L(t)$ und $s_R(t)$ die an den Ohren eines Hörers auftretenden Schalldruckverläufe. $m_i(t)$ $(i=1,..,N)$ ist das von der i-ten Schallquelle abgestrahlte Signal. $h_{iL}(t)$ und $h_{iR}(t)$ geben die Impulsantworten des Übertragungsweges von der i-ten Schallquelle zu den Ohren eines Hörers wieder. In die Impulsantworten werden die Richtcharakteristiken der Schallquellen und des menschlichen Ohres mit einbezogen.

Alle Informationen über das Schallfeld sind in den Signalen $s_L(t)$ und $s_R(t)$ enthalten, sowohl für die subjektive Beurteilung als auch für die objektive Beschreibung.

Für die subjektive Beurteilung der Schallfelder steht mit der kopfbezogenen Stereophonie ein Verfahren zur Verfügung, das alle nicht-akustischen Einflüsse auf das Urteil ausschließen kann. Die objektive Erfassung der Schallfelder mit Hilfe der Signale $s_L(t)$ und $s_R(t)$ ist dagegen i.a. schwierig. Zwar lassen sich einige Parameter wie die Lautstärke oder Kurzzeitspektren bestimmen, jedoch bereitet schon die Messung der Nachhallzeit und ähnlicher Größen viel Mühe. Man versucht daher auf zweierlei Weise, diese Schwierigkeiten zu umgehen. Entweder werden die mit bestimmten objektiven Parametern verknüpften subjektiven Empfindungen durch geeignete Fragestellungen er-

faßt, oder man errechnet aus gesondert gemessenen Impulsantworten objektive Parameter und ordnet diese den Schallfeldern zu.

Die erstgenannte Methode scheitert häufig an dem unbekannten Zusammenhang zwischen objektiven Parametern und den mit ihnen verknüpften subjektiven Empfindungen (EYSHOLDT et al., 1975). Die Berechtigung zur zweiten Methode hängt zunächst einmal davon ab, ob die in den Gleichungen (1) genannten Impulsantworten gemessen werden können. Bei einer großen Zahl von Schallquellen mit komplizierten Richtcharakteristiken (Orchester) ist dies in der Regel nicht möglich. In diesem Fall ist die Zuordnung von objektiven Parametern nur sinnvoll, wenn diese nicht stark vom Schallquellenort auf der Bühne und von der Richtcharakteristik der Sender abhängen.

Die Impulsantworten sind in der Regel nur bei Untersuchungen bekannt, bei denen die Schallfelder mit elektroakustischen Hilfsmitteln erzeugt werden. Hierzu zählen die Schallfeldsynthese (BURGTORF, SERAPHIM, 1961; MEYER et al., 1965; REICHARDT et al.,1974) und Messungen in Konzertsälen, bei denen Musiksignale über Lautsprecher abgestrahlt werden (SCHROEDER et al.,1975).

In beiden Fällen geht man von nachhallfreien Musiksignalen $m_i(t)$ aus, die mit Impulsantworten gefaltet werden. Bei der analogen Schallfeldsynthese werden die Impulsantworten durch den Direktschall, mehrere Rückwürfe und den Nachhall approximiert. Zur Erzeugung des Schallfeldes wird das Musikstück verzögert, verhallt und über geeignet aufgestellte Lautsprecher abgestrahlt. Das Verfahren ist in seinen Möglichkeiten jedoch dadurch begrenzt, daß nur etwa 1o bis 15 diskrete Rückwürfe nachgebildet werden können (WAGENER, 1971). Außerdem kann die Nachhallstatistik praktisch nicht beeinflußt werden.

Bei der digitalen Schallfeldsynthese werden die Signale $s_L(t)$ und $s_R(t)$ nach den Gleichungen (1) auf einer Rechenanlage berechnet. Die Impulsantworten werden durch Messungen in Konzertsälen gewonnen. Dies Verfahren erlaubt es, Schallfelder mit

höherer Rückwurfdichte und besserer Nachhallstatistik synthetisch herzustellen. Weiterhin können die Schallfelder einfacher einer spektralen Auswertung unterzogen werden.

In der Raumakustik interessiert man sich hauptsächlich für den Zusammenhang zwischen den Saaleigenschaften und der subjektiven Beurteilung der Schallfelder im Saal. Da die Saaleigenschaften im wesentlichen in den Impulsantworten erfaßt sind, ist es notwendig, bei vergleichenden Untersuchungen die Schallquellensignale $m_1(t), \ldots, m_N(t)$ konstant zu halten.

2.2. Durchführung der digitalen Schallfeldsynthese

Bei den Untersuchungen, über die hier berichtet wird, erfolgt die digitale Schallfeldsynthese in Analogie zu den Musikaufnahmen, die von GOTTLOB (1973) und SIEBRASSE (1973) erstellt wurden. Fig. 1 a zeigt die Aufnahmeanordnung. Nachhallfrei aufgenommene Musik wird über zwei Lautsprecher stereophon abgestrahlt und mit einem Kunstkopf aufgenommen. Mit den Bezeichnungen aus Fig. 1 a gehen die Gleichungen (1) über in

$$s_L(t) = m_L(t) * h_{LL}(t) + m_R(t) * h_{RL}(t)$$
$$s_R(t) = m_L(t) * h_{LR}(t) + m_R(t) * h_{RR}(t) \qquad (1')$$

(* Faltungssymbol) .

Die Ohrsignale werden nun entsprechend mit Hilfe eines Computers berechnet. Das Verarbeitungsschema ist in Fig. 1 b skizziert.

Als Musiksignale $m_L(t)$ und $m_R(t)$ dienen, wie bei den Aufnahmen im Konzertsaal, das Finale des vierten Satzes der Jupitersinfonie von W. A. Mozart (BURD, 1969).

Die Impulsantworten $h_{LL}(t)$, $h_{LR}(t)$, $h_{RL}(t)$ und $h_{RR}(t)$ werden aus Knallfunkenmessungen gewonnen, die mit zwei Ab-

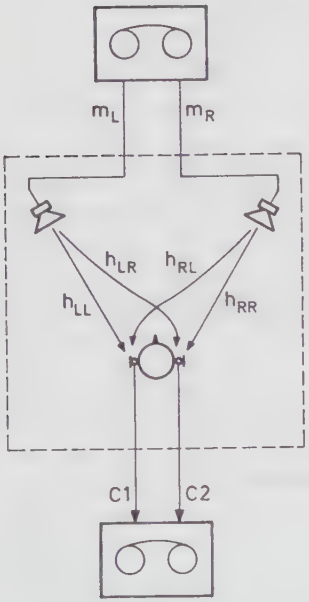

Fig. 1 a

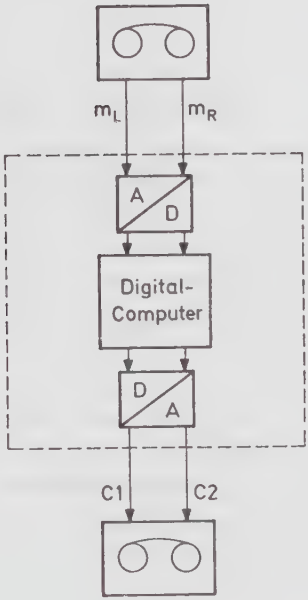

Fig. 1 b

Fig. 1

a) Schema der Aufnahmeanordnung im Konzertsaal
Nachhallfreie Musik (m_L, m_R) wird über zwei Lautsprecher auf der Bühne abgestrahlt und erreicht über die vier Übertragungswege h_{LL}, h_{LR}, h_{RL}, h_{RR} die beiden Kunstkopfohren. Die Ohrsignale werden auf Kanal 1 und 2 (C1, C2) eines Stereotonbandgerätes aufgezeichnet.

b) Simulation der Anordnung a) auf dem Rechner
Die Musiksignale m_L, m_R werden A/D-gewandelt und liegen im Rechner als Zahlenfolgen vor. Bei bekannten Impulsantworten lassen sich die Ausgangssignale berechnen, werden D/A-gewandelt und wie in Fig. 1 a auf Tonband gespeichert.

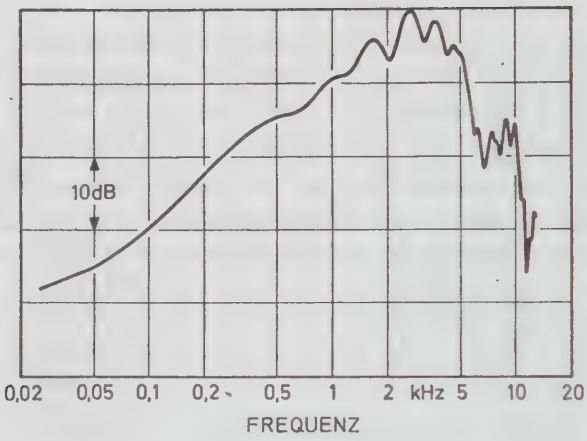

Fig. 2

Leistungsspektrum des Knallfunkens

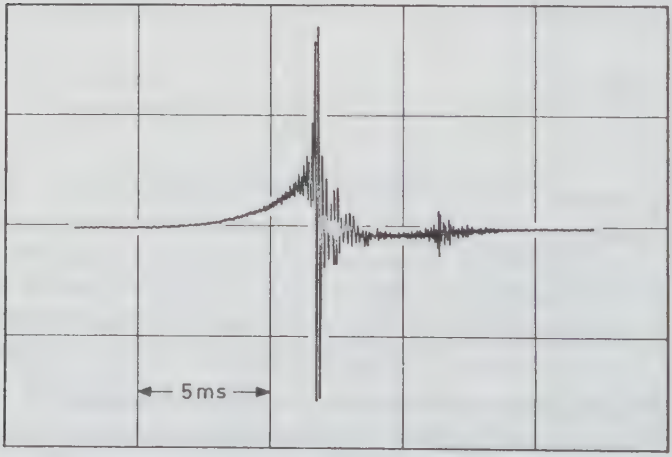

Fig. 3

Zeitfunktion des invertierten und tiefpaß-gefilterten Knallfunkens

strahlpositionen auf der Bühne in Konzertsälen gemacht wurden. Fig. 2 zeigt das Spektrum des Knallfunkens. Man sieht hieraus, daß der Knallfunken einen Dirac'schen δ-Impuls nur ungenügend approximiert. Daher sind die bei den Knallfunkenmessungen gewonnenen Signale keine Impulsantworten im Sinne der Systemtheorie, sondern Echogramme.

Man kann jedoch den Frequenzgang des Knallfunkens rechnerisch eliminieren. Hierzu wird das Spektrum des Knallfunkens invertiert, tiefpaßgefiltert und in den Zeitbereich zurücktransformiert. Die so erhaltene Funktion ist in Fig. 3 dargestellt. Mit ihr werden die Echogramme gefaltet. Das Ergebnis liefert die Funktionen $h_{LL}(t)$, $h_{LR}(t)$, $h_{RL}(t)$ und $h_{RR}(t)$.

Ein Problem bei der digitalen Schallfeldsynthese bilden die großen Datenmengen, die bei der Berechnung der Gleichungen (1') anfallen. Um zu große Rechenzeiten zu vermeiden, müssen die Signale in geeigneter Weise zeitlich begrenzt werden. s_L und s_R sollten für die Hörvergleiche mindestens 8 bis 1o s lang sein (PLENGE, 1968). Nach den bisherigen Erfahrungen sind dagegen 25 bis 4o s wünschenswert. Hier wurde ein Kompromiß von 16 s gewählt.

Die Länge der Impulsantworten wird hauptsächlich durch den Kernspeicherumfang des Computers bestimmt und muß in der vorliegenden Arbeit auf 8oo ms beschränkt werden. In diesem Zeitintervall sind in der Regel mehr als 95 % der Energie der Impulsantwort enthalten. Diese Zeitbegrenzung wird bei dem gewählten Musikstück nur am Ende hörbar.

2.3. Einsatz des Rechners zur digitalen Schallfeldsynthese

2.3.1. Beschreibung der Rechenanlage und ihrer Peripherie

Zunächst soll auf die institutseigene Rechenanlage und ihre Ein- und Ausgabesysteme für akustische Signale eingegangen werden. Das Dritte Physikalische Institut besitzt eine Rechenanlage vom Typ H 632 der Fa. Honeywell-Bull, ein 32-bit Rechner mit einem Kernspeicher von 24 K Worten. Dieser Rechner ist seiner Struktur nach als Prozeßrechner und für off-line Rechnungen einsetzbar. An peripheren Geräten stehen zur Verfügung: eine langsame 7-Spur Bandstation, 4 Magnetplatten-Einheiten, ein Zeilendrucker, ein Plotter, ein Sichtgerät, eine Konsolschreibmaschine und ein Kartenleser. Außerdem wurde ein zweikanaliger Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler) sowie ein Digital-Analog-(D/A-) Wandler entwickelt und angeschlossen.

2.3.2. Ein- und Ausgabe akustischer Signale

Die Eingabe von Signalen in den Rechner geschieht mit dem selbstgebauten A/D-Wandler, der 12-bit-Worte (1 Vorzeichen und 11 bit) bei einer maximalen Transferrate von 1oo kHz liefert. Der A/D-Wandler arbeitet wahlweise ein- oder zweikanalig, seine Abtastfrequenz ("Samplingfrequenz") wird durch einen internen quarzstabilisierten Pulsgenerator ("Clock") vorgegeben, der von außen einstellbar ist. Beim A/D-Wandeln werden die digitalen Signale in den Kernspeicher des Rechners übertragen und in Halbworten (16 bit) organisiert. Die Kapazität des Kernspeichers läßt die Übernahme und Speicherung von ca. 32 K Daten mit einer Wortlänge von 16 bit zu. Diese Datenmenge ist bei der Bearbeitung raumakustischer Probleme mit hohen Samplingfrequenzen oder langen Zeitsignalen nicht ausreichend. Deshalb müssen die Daten beim A/D-Wandeln aus dem Kernspeicher auf einen schnellen Massenspeicher (hier auf eine Magnetplatte) geschrieben werden, wo

sie zur Weiterverarbeitung zur Verfügung stehen. Die maximal mögliche Samplingfrequenz wird in diesem Fall durch die Übertragungsgeschwindigkeit (3o kHz) der Magnetplatte begrenzt. Bedingt durch die Datenorganisation in Rechner-Halbworten gilt diese Transferrate für zweikanalige Signale; bei einkanaligem A/D-Wandeln verdoppelt sie sich auf 6o kHz.

Durch das Positionieren der Lese-Schreibköpfe der Magnetplatte entsteht ein Zeitverlust, der bis zu 3o ms ausmachen kann. Die Datenübertragung wird während dieser Positionierungszeit angehalten. Die so entstehenden Lücken im Signal müssen durch Zwischenspeicherung ("Pufferung") im Kernspeicher geschlossen werden. Das hierzu nötige Assembler-Programm arbeitet gleichzeitig auf zwei Prioritätsebenen im Rechner, von wo aus es die unabhängig laufenden Ein-Ausgabe-Prozesse überwacht und ggf. neu initialisiert.

Für die D/A-Ausgabe aus dem Rechner gelten sinngemäß dieselben technischen Angaben wie für die A/D-Eingabe. Auch der D/A-Wandler hat eine Auflösung von 12 bit und kann im Zusammenhang mit der Magnetplatte unter Kontrolle der D/A-Software mit Samplingfrequenzen bis zu 3o kHz zweikanalig Daten ausgeben.

Die auf diese Art erreichbare Qualität der Signale ist mit 66 dB Signal-Rauschabstand und einer Bandbreite von 15 kHz pro Kanal durchaus vergleichbar mit der von halbprofessionellen AM-Tonbandgeräten.

Bei der Wahl der Samplingfrequenz muß außer der gewünschten Bandbreite berücksichtigt werden, daß die Datenmengen und damit der Rechenaufwand in vertretbarem Rahmen bleiben. Daher wird in dieser Arbeit ausschließlich mit einer Samplingfrequenz von 26 kHz gearbeitet (entsprechend einer theoretischen Bandbreite von 13 kHz). Diese Qualität ist den vorliegenden Aufnahmen angemessen.

2.3.3. Ausführung der Rechnungen

Die institutseigene Rechenanlage ist für derart umfangreiche und rechenintensive Aufgaben zu klein. Für die Faltungen nach (1') wird ein System gebraucht, das viel Kernspeicher und einen großen, schnellen Massenspeicher zur Verfügung stellen kann. Die Größe des verfügbaren Kernspeichers bestimmt wesentlich die Länge der Impulsantwort und - über den Umfang der zu verwendenden Fast Fourier Transform (FFT; COOLEY, TUKEY, 1965) - die Rechenzeit. Die Rechnungen werden daher im Rechenzentrum der Gesellschaft für wissenschaftliche Datenverarbeitung m.b.H. Göttingen durchgeführt, auf einem System Univac 1108. Dafür werden neue Maschinenprogramme benötigt, die die Daten zwischen den beiden Rechnern umwandeln. Hierdurch werden mehrfache Kopierläufe zwischen Magnetplatte und -band sowie zwischen den verschiedenen Magnetbandsystemen (9-/7-Spur) notwendig. Dieser Mehraufwand wird durch die schnellere Rechengeschwindigkeit der U 1108 mehr als wettgemacht.

Für das vorliegende Projekt konnte ein Kernspeicherblock von 64 K Worten benutzt werden, worin eine FFT in Blöcken von 32 K berechnet werden kann. 20 K hiervon werden von der überlappenden Faltung (COOLEY, 1967; HELMS, 1967) der Impulsantwort zugeteilt. Mit jeder FFT werden bei dieser Konstellation 12 K Worte als Ergebnis gewonnen.

Bei einer Länge der Musik von 16 s und einer Abtastfrequenz von 26 kHz werden folglich 32 FFT's benötigt, um eine Impulsantwort mit einem nachhallfreien Musiksignal zu falten. Eine vollständige Faltung nach (1') dauert etwa 90 Minuten. Hinzu kommt eine Rechenzeit von ca. 30 Minuten für die Konvertierungen der Signale.

2.4. Subjektive Beurteilung

2.4.1. Durchführung der Hörvergleiche

Die Anordnung für die subjektiven Hörvergleiche der Aufnahmen ist in Fig. 4 dargestellt. Auf zwei Tonbandgeräten können Aufnahmen gleichzeitig abgespielt werden. Über einen elektronischen Umschalter wird jeweils eins der beiden Geräte in den reflexionsfreien Raum geschaltet. Das Signal wird über ein Kompensationsfilter nach DAMASKE (1971) und zwei Lautsprecher der Versuchsperson dargeboten, die den Umschalter beliebig oft bedienen und so zwischen den Tonbandaufnahmen hin- und herschalten kann. Durch farbige Lampen wird dem Hörer angezeigt, von welchem Tonbandgerät gerade das Signal kommt.

Die Fragestellung an die Versuchsperson ist bei den Hörvergleichen dieser Arbeit ausschließlich nicht-semantisch. Dies geschieht in Anlehnung an Ergebnisse von SIEBRASSE (1973) und nach eigenen Erfahrungen (EYSHOLDT et al., 1975) mit Fragen semantischer Art. Nach dem Vorschlag von SIEBRASSE wird der Hörer aufgefordert, dasjenige der beiden Schallfelder anzugeben, das ihm besser gefällt ("Präferenz"). Es steht ihm frei, sich nicht zu entscheiden ("keine Bevorzugung").

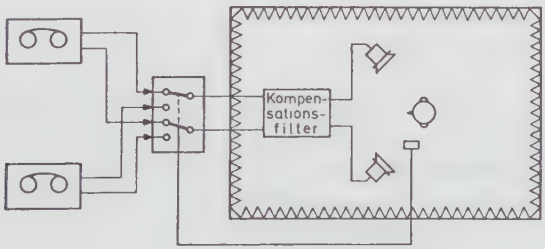

Fig. 4
Aufbau für die Durchführung der Hörvergleiche

Auf den beiden Tonbandgeräten laufen zwei Bänder, die aus N Schallfeldern statistisch so zusammengeschnitten sind, daß bei gleichzeitigem Abspielen nach einem Durchlauf gerade sämtliche N(N-1)/2 Paarvergleiche zwischen den einzelnen Schallfeldern aufgetreten sind.

2.4.2. Auswertung der Hörvergleiche

Jeder Hörer erhält einen Antwortbogen, auf dem er in unmittelbarer Aufeinanderfolge die Schallfelder kennzeichnet, die ihm besser gefallen. Sämtliche Antwortbögen werden von einem Rechner ausgezählt und zu einer vollständigen Paarvergleichsmatrix $S=(s_{ik})$ umgeformt, wobei s_{ik} die Bewertung des Hörers i für das Schallfeld k darstellt. In der weiteren Auswertung wird dann nach SLATER (1960) und SIEBRASSE (1973) die Matrix S einer Faktorenanalyse unterworfen.

Diese liefert als Ergebnis einen Präferenzraum, in dem die Schallfelder als Punkte und die Hörer als Richtungen dargestellt werden. Die Methode von SIEBRASSE soll hier um zwei Punkte ergänzt werden.

Zunächst wird als Maß für die Urteilssicherheit eine Größe g eingeführt, die angibt, in welchem Maße es den Hörern gelingt, zwischen den Schallfeldern zu differenzieren. Es ist

$$(2) \qquad g = \overline{\sigma_H^2} \;/\; \sigma_{max}^2 \qquad \text{(in \%)} \quad ,$$

wobei σ_{max}^2 die maximal mögliche Varianz einer eindimensionalen Präferenzskala darstellt. Sie wird erreicht, wenn bei m Schallfeldern je ein Schallfeld m-1, m-2, ..., 0 mal bevorzugt wird. $\overline{\sigma_H^2}$ ist der Mittelwert der von den Hörern tatsächlich erreichten Varianz.

Als zweites wird im Präferenzraum eine Konsensusrichtung definiert. Eine solche Definition erweist sich als notwendig, weil im folgenden Schallfeldkonstellationen auftreten, bei denen - im Gegensatz zu den Ergebnissen von SIEBRASSE - die Konsensusrichtung nicht mit der Richtung von Faktor 1 des Präferenzraums zusammenfällt. Als Konsensus wird die Richtung bezeichnet, für die die Summe der Projektionen der Vektoren, die die Hörer repräsentieren, maximal wird. So läßt sich schnell ersehen, ob die Faktoren (Beurteilungskriterien) von den Hörern gleichsinnig beurteilt werden.

3. Einzeluntersuchungen zu den Parametern

3.1. Veränderung der Lautstärke

Als erstes Teilproblem soll untersucht werden, inwieweit die Lautstärke eines Musikbeispiels das Präferenzurteil der Hörer beeinflussen kann. Aus den Untersuchungen von GOTTLOB (1973) und SIEBRASSE (1973) war der Schallpegel bewußt herausgehalten worden, die Musikbeispiele der Hörreihen waren alle auf subjektiv gleiche Lautstärke eingestellt worden. Hingegen fand WILKENS (1975), daß der "Stärkegrad" von den Hörern als wichtigstes Kriterium bei der Beurteilung herangezogen wird.

Die Veränderung der Lautstärke geschieht am einfachsten mit Mitteln der Analogtechnik. Aus einer Kunstkopfaufnahme eines Original-Konzertes (J. Brahms, 2. Symphonie D-Dur) werden 4o s (1. Satz, 2. Thema) ausgeblendet und bei verschiedenen Pegeln überspielt. Die Pegel werden im reflexionsfreien Raum am Ort der Versuchsperson mit einem Schallpegelmesser A-bewertet gemessen. Auf diese Weise werden 7 Schallfelder erstellt, die im Mezzoforte am Hörerplatz mittlere Pegel von 78 dB(A) bis 9o dB(A) im Abstand von 2 dB(A) erzeugen. Diese Schallpegel sind hoch genug gewählt, um beim Hörer den Eindruck der "Räumlichkeit" (KUHL, 1975 u. 1976) entstehen zu lassen.

Die Aufnahmen werden von 14 Hörern in einer vollständigen Paarvergleichsserie beurteilt. Die mehrdimensionale Auswertung der Antworten ergibt bei sehr hoher Urteilssicherheit (g = 76 %) einen zweidimensionalen Präferenzraum (Fig. 5), in dem Faktor 1 68 % und Faktor 2 23 % der Varianz repräsentiert. Hingegen weist der Konsensusvektor nicht in die Richtung von Faktor 1, was für eine uneinheitliche Beurteilung durch die Hörer spricht.

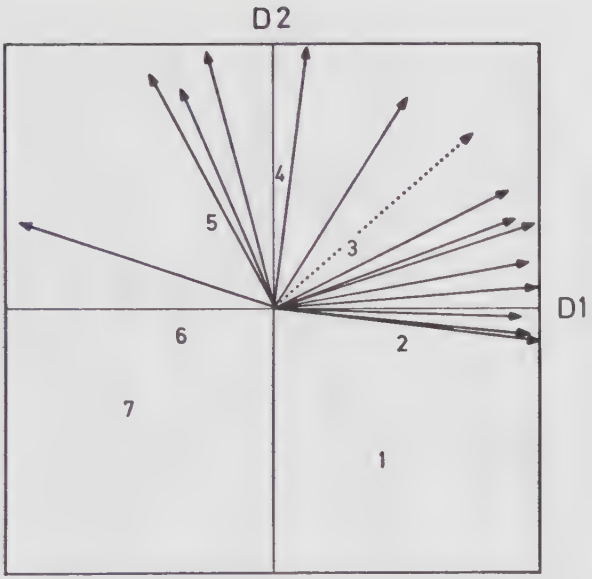

Fig. 5
Hörvergleichsreihe mit Schallfeldern unterschiedlicher Lautstärke, zweidimensionaler Präferenzraum. Die Pfeile stellen die Lage der einzelnen Hörer dar, die Zahlen die der Schallfelder. Der punktierte Pfeil ist die Konsensusrichtung.

Bei Betrachtung der individuellen Urteilsserien fällt auf, daß jeder Hörer etwa dieselbe Kurvenform liefert: ein oder zwei Schallfelder erscheinen ihm optimal laut, lautere oder leisere werden um so mehr abgelehnt, je größer die Lautstärkedifferenz zu diesem Optimum ist. In Fig. 6 ist diese Urteilsanordnung für zwei Hörer exemplarisch dargestellt. Individuell unterschiedlich ist die Lage des Optimums, das insgesamt einen Streubereich von 9 dB aufweist.

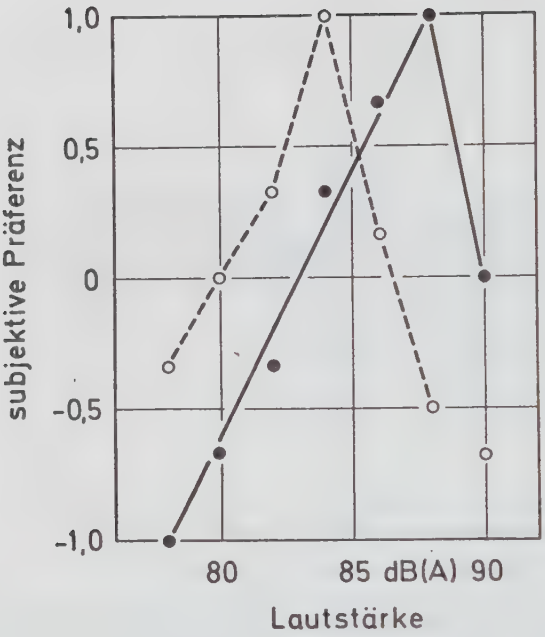

Fig. 6
Individuelle Urteilskurven zweier Hörer bei Veränderung der Lautstärke. Beide Hörer besitzen ein ausgeprägtes Lautstärke-Optimum.

Die Hörer werden in zwei Geschmacksgruppen zusammengefaßt, von denen die eine eher lautere Schallfelder bevorzugt, während die andere sich mehr für leisere entscheidet. Nach diesen Gruppen geordnet, ist der Zusammenhang zwischen Präferenz und Lautstärke in Fig. 7 aufgetragen. Beide Geschmacksgruppen ergeben eine der individuellen ähnliche Kurvenform: es existiert eine optimale Lautstärke, auf deren beiden Seiten die Präferenz wieder abnimmt.

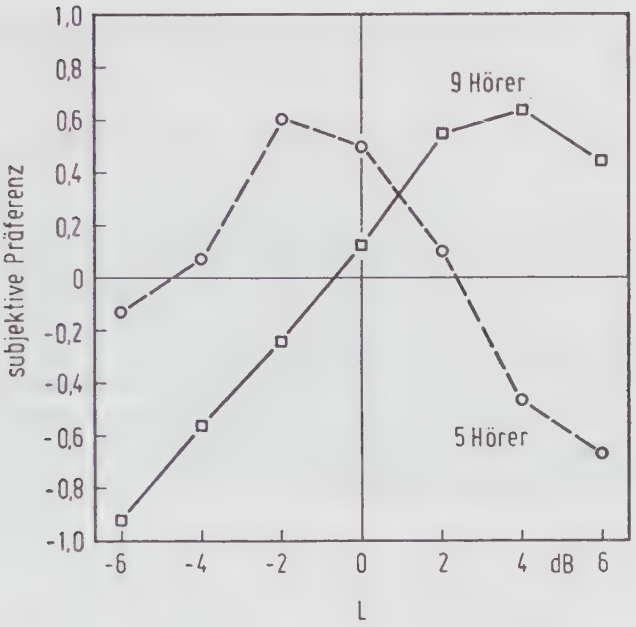

Fig. 7
Zusammenhang zwischen Präferenz und Lautstärke; 14 Hörer, nach zwei Geschmacksgruppen geordnet. Der Abszissenwert O dB entspricht 84 dB(A) am Platz der Versuchsperson im reflexionsfreien Raum.

Hieraus liest man zunächst ab, daß die gewählte Schrittweite von 2 dB(A) groß genug ist, um von den Hörern (jedenfalls im Paarvergleich) sicher unterschieden zu werden. Weiterhin scheint der von diesen Schallfeldern überstrichene Bereich von 12 dB(A) größer zu sein als die maximale Differenz zwischen den Optimalwerten.

Dieses Ergebnis kann sicherlich nicht dahingehend interpretiert werden, daß der mittlere Schallpegel in einem Kon-

zertsaal im angegebenen Bereich liegen sollte. In einem Vorversuch hat sich gezeigt, daß Pegeldifferenzen von 2 dB(A) nicht mehr sicher erkannt werden, wenn die Hörvergleiche seriell mit längeren Pausen zwischen den Musikbeispielen durchgeführt werden. Man kann wohl nur folgern, daß in einer Paarvergleichsserie eine Kurvenform wie in Fig. 7 resultiert, wenn die Unterschiede zwischen den Beispielen über der absoluten Wahrnehmbarkeitsschwelle der Hörer liegen. Die Lage des Optimums ist geschmacksabhängig und in gewissen Grenzen variabel. Extremwerte in beiden Richtungen werden einhellig abgelehnt. In realen Konzertsälen treten derartige Extremwerte nur selten auf: GOTTLOB und SIEBRASSE fanden in 25 europäischen Konzertsälen maximale Differenzen von 9 dB(A), während 19 Säle nur um 3 dB(A) auseinander lagen.

3.2. Variation der Nachhallzeit

3.2.1. Modifizierung der Impulsantworten

Wegen der hohen Korrelation der Meßdaten konnte in früheren Untersuchungen keine Aussage darüber gemacht werden, welche der Nachhallzeitdefinitionen am besten für die Erfassung des subjektiven Eindrucks geeignet ist.

Deshalb soll in den Impulsantworten die Nachhallzeit zum einen oberhalb einer Zeitgrenze t_o variiert werden, zum anderen über die gesamte Länge der Impulsantwort. Für die Berechnung der Bewertungsfunktionen geht man aus von einer Impulsantwort, deren Einhüllende h(t) exponentiell abklingt:

$$(3) \qquad h(t) \sim \exp(-\alpha t) = \exp(-6.9\ t/T)$$

(T Nachhallzeit) .

Gesucht ist die neue Impulsantwort h'(t) mit der Nachhallzeit T': $h'(t) \sim \exp(-6.9\ t/T')$. Dann ist

$$(4) \qquad \begin{aligned} h'(t) &\sim \exp(-\alpha' t) = \exp\left[-(\alpha' - \alpha + \alpha)\ t\right] \\ &= \exp\left[-(\alpha' - \alpha)\ t\right] \cdot \exp(-\alpha t) \\ &= \exp\left[-(\alpha' - \alpha)\ t\right] \cdot h(t) \\ &= \exp\left[-6.9\ t\ \left(\frac{1}{T'} - \frac{1}{T}\right)\right] \cdot h(t) \end{aligned}$$

Um eine Impulsantwort der neuen Nachhallzeit T' zu erhalten, muß man die alte Impulsantwort h(t) mit der Zeitfunktion

$$(5) \qquad F(t) = \exp\left[-6.9\ t\ \left(\frac{1}{T'} - \frac{1}{T}\right)\right]$$

multiplizieren. Die Formel (5) ist nach (4) unabhängig davon, ob $T' \gtrless T$ ist.

Will man die Nachhallzeit erst oberhalb einer Zeitgrenze t_o variieren, so setzt man analog zu (4)

$$(6) \qquad h'(t) = h(t) \cdot \exp\left[-6.9\ (t-t_o)\ \left(\frac{1}{T'} - \frac{1}{T}\right)\right]$$

für $t \geqslant t_o$.

Damit sich die Steigung der Nachhallkurve (SCHROEDER, 1965)

$$(7) \qquad R(t) = 10\ \lg\left[\frac{\int_t^\infty h^2(t')\ dt'}{\int_0^\infty h^2(t')\ dt'}\right]$$

im frühen Teil nicht ändert (konstante "early decay time" (JORDAN, 1969), d.h. keine Änderung der Nachhallkurve innerhalb des Bereichs 0 bis -10 dB), muß die Energie im frühen Teil bezogen auf die späte Energie konstant bleiben. Hieraus ergibt sich die Nebenbedingung

$$(8) \qquad \frac{E_f}{E_s} = \frac{\int_0^{t_o} h^2(t)\ dt}{\int_{t_o}^\infty h^2(t)\ dt} \stackrel{!}{=} \frac{\int_0^{t_o} h'^2(t)\ dt}{\int_{t_o}^\infty h'^2(t)\ dt} = \frac{E'_f}{E'_s}$$

Es gilt dann

$$(9) \qquad h'(t) = r \cdot h(t)$$

für $t < t_o$ mit

$$(10) \qquad r = \sqrt{E'_s / E_s} \qquad \text{nach Gleichung (8).}$$

Falls $T' < T$, so ist auch $E'_s < E_s$ und damit $r < 1$. Die Impulsantwort ist also mit dem Zeitfenster

$$(11) \qquad F(t) = \begin{cases} r & t < t_o \\ \exp\left[-6.9\ (t-t_o)\ \left(\frac{1}{T'} - \frac{1}{T}\right)\right] & t \geqslant t_o \end{cases}$$

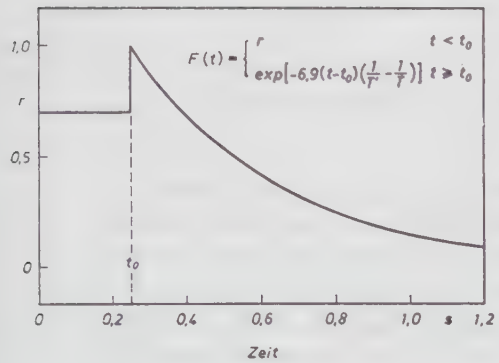

Fig. 8
Bewertungsfunktion zur Anpassung der Nachhallzeit oberhalb einer Zeitgrenze t_o

zu multiplizieren. F(t) ist in Fig. 8 dargestellt.

Die zu h'(t) = F(t) · h(t) gehörende Nachhallkurve R'(t) besteht, wenn h(t) $\sim$ exp (- α t) ist, aus zwei Geraden unterschiedlicher Steigung. Fig. 9 zeigt eine Schar derartiger Nachhallkurven.

Mit dem hier skizzierten Verfahren ist es daher möglich, Impulsantworten zu berechnen, deren Nachhallkurven "durchhängen" bzw. "ausgebeult" sind.

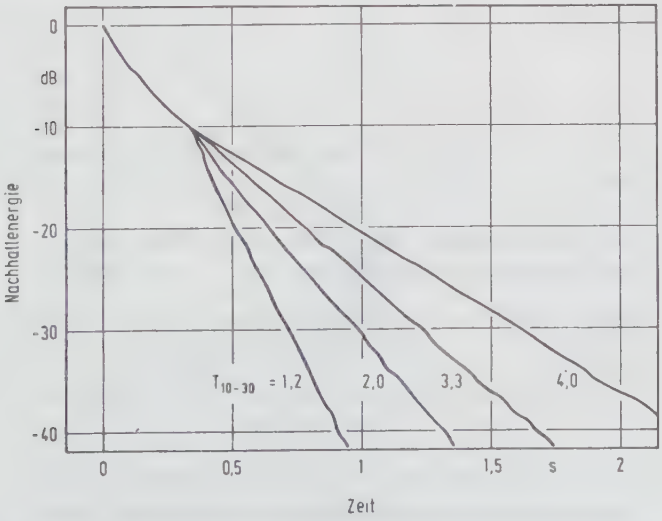

Fig. 9
Nachhallkurvenschar, berechnet mit Zeitfenster nach Fig. 8.

3.2.2. Variation der Nachhallzeit bei konstanter "early decay time"

Es werden 1o Schallfelder erstellt, in denen gemäß Gleichung (11) bei konstanter EDT die Nachhallzeit systematisch von 1.5 bis 3.o s variiert wird. Die Werte beziehen sich auf Messung in einem terzbreiten Frequenzband um 1 kHz. In Tabelle 1 sind einige wichtige Parameterwerte der Schallfelder für Messungen bei 1 kHz und breitbandige Messungen zusammengestellt.

Man entnimmt Tabelle 1, daß alle angegebenen Parameter außer der Nachhallzeit T konstant bleiben.

Die Schallfelder werden von 12 Hörern bezüglich der Präferenz beurteilt. Die Auswertung der Hörvergleiche ergibt eine Urteilssicherheit von g = 21 %. Dieser Wert ist sehr niedrig und zeigt an, daß die Hörer die Schallfelder nur wenig unterscheiden können.

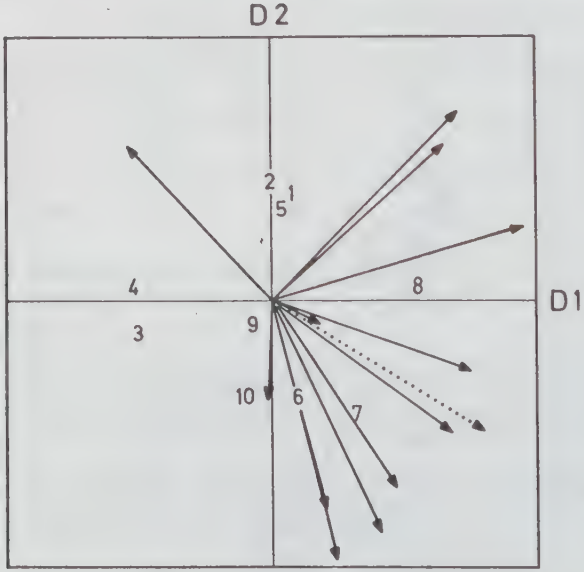

Fig. 1o
Präferenzraum zur Variation der Nachhallzeit bei konstanter EDT

Nr.	1 kHz (Terz)				breitbandig			
	T (s)	EDT (s)	C(dB)	K	T (s)	EDT (s)	C(dB)	K
1	1.5	3.1	-3.8	o.34	1.3	2.1	o.6	o.34
2	1.7	3.1	-3.8	o.34	1.6	2.1	o.6	o.34
3	1.9	3.1	-3.8	o.34	1.8	2.1	o.6	o.34
4	2.o	3.1	-3.8	o.34	1.9	2.1	o.6	o.34
5	2.1	3.1	-3.8	o.34	2.o	2.1	o.6	o.34
6	2.2	3.1	-3.8	o.34	2.1	2.1	o.6	o.34
7	2.3	3.1	-3.8	o.34	2.2	2.1	o.6	o.34
8	2.5	3.1	-3.8	o.34	2.4	2.1	o.6	o.34
9	2.7	3.1	-3.8	o.34	2.6	2.1	o.6	o.34
1o	3.o	3.1	-3.8	o.34	2.8	2.1	o.6	o.34

Tabelle 1

Werte einiger Schallfeldparameter der Hörreihe mit Variation der Nachhallzeit bei konstanter "early decay time".

T Nachhallzeit, Auswertung der Nachhallkurve im Bereich von -5 bis -3o dB (auf 6o dB extrapoliert)

EDT early decay time, Auswertung der Nachhallkurve im Bereich von O bis -1o dB

C Klarheitsmaß, Pegeldifferenz zwischen früher (8o ms) und später Energie

K Korrelationsgrad, Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion zwischen beiden Ohrsignalen im Bereich $|\tau| < 1$ ms (DAMASKE, ANDO, 1972)

Dies geht auch aus den Aussagen der Hörer hervor, die angeben, daß alle Schallfelder sehr ähnlich klingen. In Fig. 1o ist die Ebene der Faktoren 1 und 2 des Präferenzraums dargestellt. Die Pfeile kennzeichnen die Hörer, die Ziffern geben die Schallfelder entsprechend Tabelle 1 wieder. Der punktierte Pfeil weist in die Konsensusrichtung.

Keiner der beiden Faktoren, die 3o % bzw. 23 % der Gesamtvarianz repräsentieren, läßt sich eindeutig als Konsensusfaktor interpretieren. Betrachtet man die Lage der Schallfelder bezüglich der Konsensusrichtung, so unterscheiden sie sich nur wenig voneinander. In Fig. 11 ist die mittlere Präferenzskala in Abhängigkeit von der Nachhallzeit aufgetragen. Hier ist kein Zusammenhang zwischen den objektiven und subjektiven Daten erkennbar.

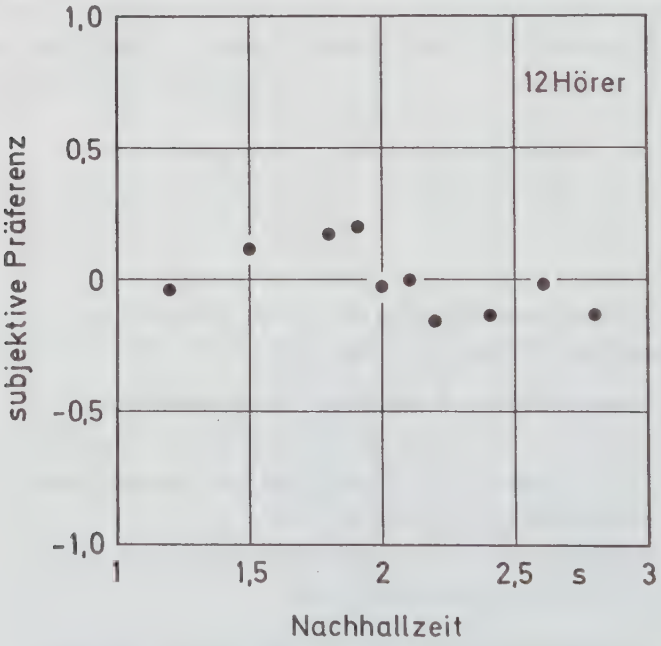

Fig. 11
Zusammenhang zwischen Präferenz und Nachhallzeit bei Hörvergleichsreihe mit konstanter EDT.

Die Nachhallzeit hat also bei konstanter EDT keinen Einfluß auf die subjektive Beurteilung. Dieses Ergebnis ist für Musikstücke ohne Abrisse zu erwarten, da der Energieanteil des Nachhalls, der bei den Untersuchungen variiert wird, nur gering ist. Messungen von ATAL et al. (1965) über die subjektiv empfundene Nachhallzeit führen zu ähnlichen Ergebnissen.

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen an, daß zur objektiven Erfassung des mit der Nachhallzeit verbundenen subjektiven Eindrucks eine Auswertung der Nachhallkurve bis - 1o dB ausreichend ist. Möglicherweise kann der Bereich sogar noch verkürzt werden.

	1 kHz (Terz)				breitbandig		
Nr.	T (s)	EDT (s)	C(dB)	K	T (s)	EDT (s)	C(dB)
1	1.5	1.6	o.4	o.38	1.3	1.1	4.o
2	1.7	1.9	-o.7	o.37	1.6	1.3	3.o
3	1.8	2.o	-1.1	o.37	1.7	1.4	2.7
4	1.9	2.1	-1.5	o.37	1.8	1.4	2.4
5	2.o	2.2	-1.7	o.37	1.9	1.5	2.2
6	2.o	2.3	-2.o	o.37	2.o	1.6	2.o
7	2.1	2.4	-2.2	o.37	2.1	1.7	1.7
8	2.3	2.5	-2.5	o.37	2.2	1.7	1.5
9	2.5	2.7	-3.o	o.37	2.4	2.o	1.o
1o	2.7	3.1	-3.8	o.37	2.6	2.2	o.5

Tabelle 2

Werte einiger Schallfeldparameter der Hörreihe mit Variation der "early decay time"

Erläuterung der Parameter s. S. 25 unter Tabelle 1.

3.2.3. Variation der "early decay time"

In einer zweiten Meßreihe werden nun Schallfelder untersucht, bei denen die Nachhallzeit gemäß Gleichung (5) über die gesamte Impulsantwort von 1.5 s bis 2.7 s variiert wird. In Tabelle 2 sind wiederum einige Parameterwerte zusammengestellt.

Tabelle 2 zeigt an, daß alle Parameter mit Ausnahme des Korrelationsgrades systematisch geändert werden. Dabei wird die EDT von 1.6 s bis 3.1 s variiert. Schallfelder mit kürzeren Nachhallzeiten werden nicht einbezogen, da Vorversuche zeigten, daß diese Schallfelder stets als zu trocken abgelehnt werden. Die Schallfelder werden von 1o Hörern nach dem oben beschriebenen Verfahren beurteilt. Die Urteilssicherheit ist bei dieser Versuchsreihe wesentlich höher als bei der vorangehenden (g = 48 %). Fig. 12 zeigt den Präferenzraum. Die beiden dargestellten Faktoren repräsentieren 58 % und 15 % der Gesamtvarianz. Man erkennt, daß sich der erste

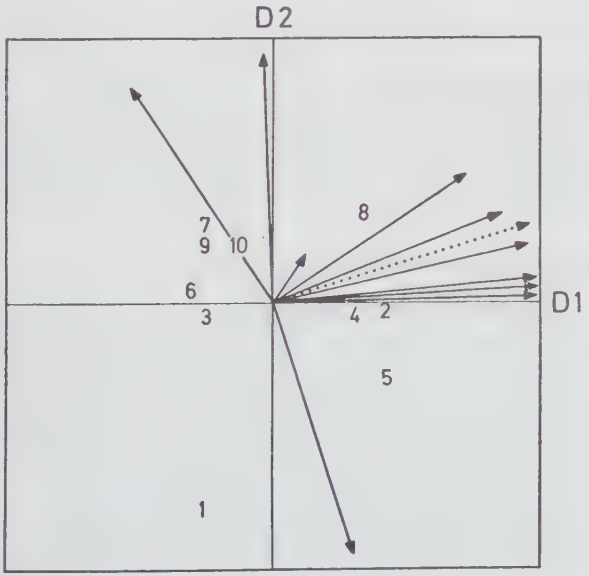

Fig. 12
Präferenzraum zur Hörvergleichsreihe mit Veränderung der EDT
1o Hörer (Pfeile)
1o Schallfelder (Ziffern)
gepunkteter Pfeil: Konsensusvektor

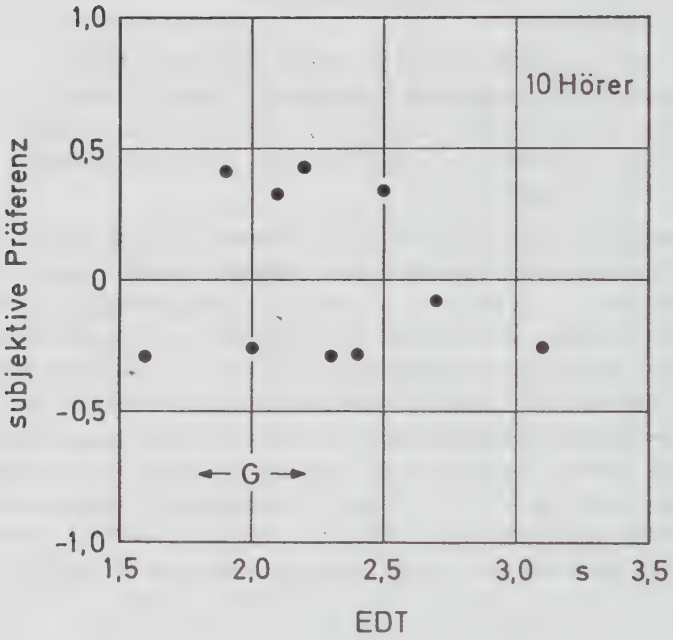

Fig. 13
Hörvergleichsreihe zur Veränderung der EDT, Zusammenhang zwischen Präferenz und EDT. Das mit "G" gekennzeichnete Intervall wurde von GOTTLOB (1973) als Optimum angegeben.

Faktor als Konsensusfaktor interpretieren läßt.

In Fig. 13 ist die mittlere Präferenzskala in Abhängigkeit von der EDT aufgetragen. Der mit "G" bezeichnete Bereich wurde von GOTTLOB (1973) als optimaler Nachhallzeitbereich angegeben. Die Schallfelder lassen sich in zwei Gruppen einteilen, in denen die subjektive Beurteilung etwa gleich ist. Ein systematischer Zusammenhang zwischen Präferenz und EDT etwa in Form eines optimalen Nachhallzeitbereiches deutet sich nur an. So werden die Schallfelder mit EDT $\leqslant$ 1.6 s

und EDT $\geqslant$ 3.1 s etwas stärker abgelehnt, jedoch sind die Präferenzschwankungen im mittleren Bereich insgesamt wesentlich stärker.

Die Vermutung liegt nahe, daß hier bei der subjektiven Beurteilung andere Parameter als die Nachhallzeit eine Rolle gespielt haben. Ein erneutes Abhören der Aufnahmen ergab, daß die Schallfelder eine unterschiedliche Klangfarbe hatten. Dabei klingen nach den Angaben einiger geübter Hörer die Schallfelder in der positiv beurteilten Gruppe wesentlich heller. Es wurde nun versucht, den Klangfarbenunterschied objektiv zu erfassen. Hierzu werden Kurzzeitspektren der Schallfelder über jeweils 80 ms berechnet und miteinander verglichen. Die Spektren weichen in der verschiedenen Abschnitten des Musikstückes nur wenig ($<$ 1 dB) voneinander ab. Die gemessenen Unterschiede sind zu klein, um eine signifikante Bedeutung für die Hörerurteile zu haben. Es fehlt an dieser Stelle ein geeigneter Parameter für die Beschreibung der subjektiv relevanten Klangfarbe.

Daß die Klangfarbe eines Musikbeispiels für die subjektive Beurteilung wesentlich ist, zeigen auch Untersuchungen von WILKENS (1975).

Die hier vorgelegten Untersuchungen weisen darauf hin, daß die Klangfarbenunterschiede u.U. einen wesentlich stärkeren Einfluß auf die Hörsamkeit haben können als die Nachhallzeitunterschiede innerhalb der angegebenen Grenzen.

3.3. Variation des interauralen Korrelationsgrades

3.3.1. Erstellung der Schallfelder

Der interaurale Korrelationsgrad K wird aus der Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) zwischen den Ohrsignalen bestimmt. Für Schallsignale nach den Gleichungen (1) (vgl. S. 4) erhält man für die normierte KKF (bei $s_{L,R} \neq 0$ nur im Zeitintervall O,T)

$$\Phi_{LR}(t) = \frac{\frac{1}{T}\int_0^T s_L(t')\, s_R(t-t')\, dt'}{\frac{1}{T}\sqrt{\int_0^T s_L^2(t')\, dt' \cdot \int_0^T s_R^2(t')\, dt'}} = \frac{s_L(t) * s_R(-t)}{\sqrt{s_L \cdot s_R}}$$

(12)

$$= \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{N} h_{iL}(t) * h_{kR}(-t) * m_i(t) * m_k(-t)}{\sqrt{s_L \cdot s_R}}$$

Aus Gleichung (12) geht hervor, daß die KKF nicht nur von der Schallquellenverteilung auf der Bühne und den Übertragungseigenschaften des Saales abhängt, sondern auch von der Kohärenz der verschiedenen Schallsignale. Für unabhängige Schallquellen vereinfacht sich (12) zu

$$\Phi_{LR}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N} h_{iL}(t) * h_{iR}(-t) * m_i(t) * m_i(-t)}{\sqrt{s_L \cdot s_R}} \quad (13)$$

Der interaurale Korrelationsgrad ist definiert als das Maximum der KKF im Verzögerungsbereich $\Delta\tau = 1$ ms. K ist ein signifikanter Faktor für die Bestimmung der Hörrichtung einer Schallquelle oder des Grades der subjektiven Diffusität eines Schallfeldes (DAMASKE, 1967/68 u. 1969/7o).

Unter gewissen Voraussetzungen läßt sich aus K das Verhältnis der aus seitlichen Richtungen einfallenden zur übrigen Schallenergie berechnen (GOTTLOB, 1973).

Für eine systematische Änderung des interauralen Korrelationsgrades bieten sich zwei Methoden an. Bei der einen werden die Impulsantworten h_L und h_R (vgl. Abschnitt 3.2.) durch das Einfügen von Rückwürfen modifiziert. Dem entspricht im Konzertsaal die Anbringung zusätzlicher reflektierender Flächen im Bühnenbereich. Es gilt dann für die abgeänderten Impulsantworten

$$
\begin{aligned}
h'_L(t) &= h_L(t) + a_o \, h_L^{(\varphi,\theta)}(t - t_o) \\
h'_R(t) &= h_R(t) + a_o \, h_R^{(\varphi,\theta)}(t - t_o) \quad .
\end{aligned}
\tag{14}
$$

Hierbei sind die $h_{L,R}^{(\varphi,\theta)}$ die mit einem Kunstkopf gemessenen Impulsantworten für den Schalleinfall aus der Richtung mit dem Azimut φ und dem Erhebungswinkel θ. a_o und t_o geben die Amplitude und die Zeitverzögerung des Rückwurfes an.

Um andere Parameter (etwa die Nachhallzeit) nicht zu verändern, muß gegebenenfalls die späte Energie noch korrigiert werden.

Die zweite Methode benutzt die Möglichkeit, die Kreuzkorrelationsfunktion der an den Ohren gemessenen Signale durch Mischen zu verändern. Bedingt durch seine Definition als Maximalwert der KKF ist der interaurale Korrelationsgrad einer direkten systematischen Änderung nicht zugänglich. Dagegen lassen sich Werte der KKF für die Verzögerung $\tau = 0$ unmittelbar einstellen. Ein Verfahren hierzu wird im folgenden geschildert.

Gegeben seien zwei voneinander verschiedene Signale $s_L(t)$ und $s_R(t)$ ($s_{L,R} \neq 0$ nur zwischen 0 und T) mit den Energien

$$
S_{L,R} = \int_0^T s_{L,R}^2(t)\, dt \tag{15}
$$

(wie oben) und der Kovarianz

$$
\varphi_{LR} = \Phi_{LR}(o) \cdot \sqrt{S_L \cdot S_R} \quad . \tag{16}
$$

Unter Einführung zweier Faktoren a, b ($a, b \geq 0$) lassen sich nun neue Signale s'_L und s'_R definieren durch

$$(17) \qquad \begin{aligned} s'_L(t) &= \tfrac{1}{2}\left[(a+b)\, s_L(t) + (a-b)\, s_R(t)\right] \\ s'_R(t) &= \tfrac{1}{2}\left[(a-b)\, s_L(t) + (a+b)\, s_R(t)\right] \end{aligned}$$

Die Faktoren a, b werden so bestimmt, daß die Gesamtenergie im alten und neuen Signal gleich bleibt und daß die Kovarianz φ'_{LR} einen vorgegebenen Wert annimmt. Aus der ersten Bedingung

$$(18) \qquad S_L + S_R = S'_L + S'_R$$

folgt dann

$$(19) \qquad b^2 = \frac{2\,(S_L + S_R) - a^2\,(S_L + S_R + 2\,\varphi_{LR})}{S_L + S_R - 2\,\varphi_{LR}}$$

Für $a = 0$ erreicht b einen Maximalwert b_{max}. Da b stets reell sein muß, folgt aus (19)

$$(20) \qquad a^2 \leqslant \frac{2\,(S_L + S_R)}{S_L + S_R + 2\,\varphi_{LR}} = a^2_{max} \quad .$$

Nun ist

$$(21) \qquad \varphi'_{LR} = a^2\left(\varphi_{LR} + \frac{S_L + S_R}{2}\right) - \frac{S_L + S_R}{2} \quad ,$$

woraus sich als nachträgliche Formel für a und b ergibt

$$a = \sqrt{\frac{S_L + S_R + 2\varphi'_{LR}}{S_L + S_R + 2\varphi_{LR}}}$$

(22)

$$b = \sqrt{\frac{S_L + S_R - 2\varphi'_{LR}}{S_L + S_R - 2\varphi_{LR}}}$$

Damit gilt für den normierten Korrelationskoeffizienten

(23) $$\Phi'(o) = \frac{\varphi'_{LR}}{\sqrt{S'_L \cdot S'_R}}$$

für $a = 0$; $b = b_{max}$ $\Phi'(o) = -1$

$a = 1$; $b = 1$ $\Phi'(o) = \Phi(o)$

$a = a_{max}$; $b = 0$ $\Phi'(o) = +1$.

Der Wert der KKF für die Verzögerung $\tau = 0$ kann auf diese Weise auf jeden beliebigen Wert zwischen + 1 und - 1 eingestellt werden.

In Fig. 14 ist der Zusammenhang zwischen $\Phi'(0)$ und a für drei verschiedene Werte von $\Phi(\tau = 0)$ dargestellt.

Die eben beschriebene Methode hat den Nachteil, daß der interaurale Korrelationsgrad K nicht unmittelbar variiert werden kann. Sie ist jedoch weniger rechenintensiv als die erste und kann auch in Analogtechnik durchgeführt werden.

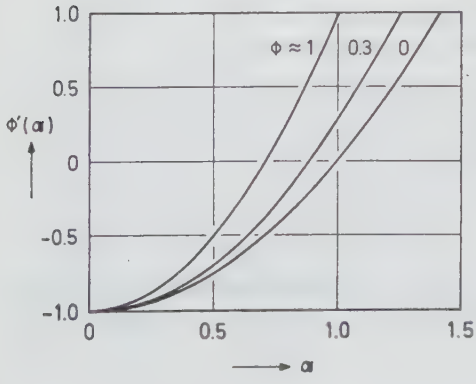

Fig. 14
$\Phi'(\tau = 0)$ als Funktion von a. Parameter ist der Wert $\Phi(\tau = 0)$ der Ausgangssignale.

3.3.2. Hörvergleiche (1. Hörreihe)

Ausgehend von einer Musikaufnahme aus dem Großen Festspielhaus in Salzburg werden nach dem zuletzt beschriebenen Verfahren 7 Schallfelder synthetisiert. Bei ihnen variiert der Wert der normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen -o.55 und +1.o. Schallfelder mit kleineren Koeffizienten werden nicht berücksichtigt, da sie, wie Voruntersuchungen ergaben, sehr unnatürlich klingen. In Tabelle 3 sind einige Parameterwerte der Schallfelder zusammengestellt.

Nr.	Φ(o)	K	S(dB)
1	-o.55	o.32	2.5
2	-o.32	o.32	1.6
3	-o.15	o.32	o.7
4	o.o4	o.32	-o.3
5	o.29	o.33	-1.2
6	o.57	o.57	-2.1
7	1.oo	1.oo	-3.4

Tabelle 3
Werte einiger Schallfeldparameter in der 1. Hörreihe mit Variation des Korrelationskoeffizienten

Φ(o) normierter Korrelationskoeffizient der Schallsignale am linken und rechten Hörerohr

K interauraler Korrelationsgrad

S Spektralparameter (Erläuterung im Text)

Die in den Tabellen 3, 4 und 5 angegebenen Werte für Φ(o) und K werden aus einer Langzeit-Korrelation (16 s) mit einem

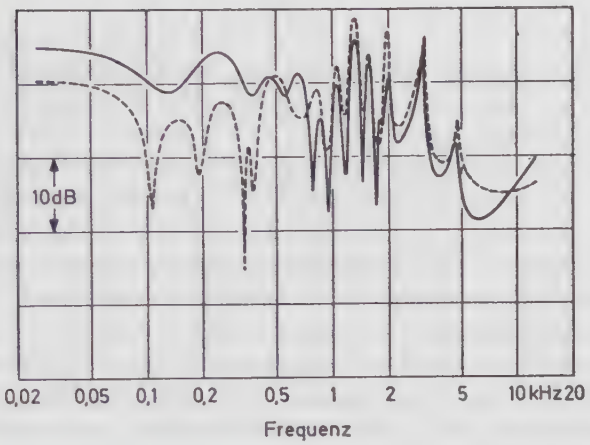

Fig. 15

Vergleichbare Kurzzeitleistungsspektren (8o ms) aus Schallfeld Nr. 1 (gestrichelt) und Nr. 7 nach Tabelle 3.

Korrelator (PAR Modell 1o1) in Hybridtechnik ermittelt. Als Signale dienen direkt die Musikaufnahmen $s'_L(t)$, $s'_R(t)$ nach Gleichung (17). In den Parametern Φ und K ist die Autokorrelationsfunktion der Musik also berücksichtigt. Die Daten sind mit den von GOTTLOB (1973) angegebenen Korrelationsgraden daher nicht vergleichbar.

Als zusätzliche Kenngröße ist in Tabelle 3 ein Parameter S eingeführt, der die Klangunterschiede zwischen den Schallfeldern beschreiben soll. Seine Definition wird notwendig, weil einige Schallfelder dieser Hörreihe durch verschiedene Spektralanteile völlig unterschiedlich klingen. Meßtechnisch ist dies für Schallfeld Nr. 1 und Nr. 7 in Fig. 15 dargestellt, die zwei über das gesamte Stück gemittelte Kurzzeitspektren (8o ms) zeigt. Diese Spektren sind per Programm aus den im Rechner vorliegenden Musiksignalen berechnet. Durch die digitale Abtastung ist es möglich, auf eine Abtastperiode genau dieselben Zeitausschnitte aus den Musikbeispielen zu vergleichen.

Aus Fig. 15 geht hervor, daß bei hohen Frequenzen (oberhalb 5oo Hz) die Unterschiede gering sind, während bei tieferen Frequenzen (unterhalb 5oo Hz) Abweichungen von 1o dB und mehr auftreten. Der Grund hierfür liegt im Mikrofonabstand von 2o cm am Kunstkopf und in dem Mischverfahren, das in Abschnitt 3.3.1. beschrieben wurde. In den Ausgangssignalen $s_L(t)$ und $s_R(t)$ sind die tiefen Frequenzen (mit Wellenlängen $\lambda \gg 2o$ cm) hoch korreliert, während die hohen Frequenzen ($\lambda \lesssim 2o$ cm) inkohärent sind. Durch das Mischen der Signale mit verschiedenem Vorzeichen werden die Tiefen kohärent addiert bzw. subtrahiert, die Höhen hingegen inkohärent. Als Folge tritt eine Verschiebung des Verhältnisses Höhen/Tiefen auf.

Zur Erfassung des Verhältnisses dient der Parameter S:

$$(24) \qquad S = 1o \lg \frac{\int_{f_3}^{f_4} M(f)\, df \,/\, (f_4 - f_3)}{\int_{f_1}^{f_2} M(f)\, df \,/\, (f_2 - f_1)} \quad dB$$

Hierin ist M(f) das A-bewertete Leistungsspektrum der Musiksignale, das aus Summation der 8o ms-Kurzzeitspektren entsteht. Die Frequenzbänder werden nach Fig. 15 im folgenden

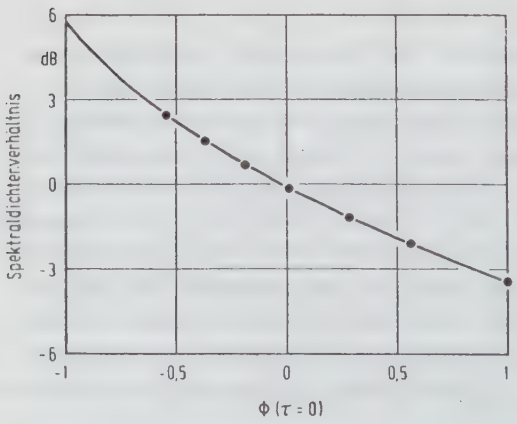

Fig. 16

Zusammenhang zwischen dem Spektraldichtenverhältnis S und dem normierten Korrelationskoeffizienten $\Phi'(o)$. Die Punkte kennzeichnen die Schallfelder 1 bis 7 nach Tabelle 3.

so gewählt: f_1 = 5o Hz, $f_2 = f_3$ = 5oo Hz, f_4 = 5ooo Hz. S ändert sich mit $\Phi'(o)$ monoton, wie aus Tabelle 3 hervorgeht. Der theoretische Zusammenhang ist in Fig. 16 gezeigt.

Die Schallfelder werden von 12 Hörern bezüglich der Präferenz beurteilt. Die Urteilssicherheit ist sehr hoch (g = 76 %).

Die Auswertung der Hörvergleiche mit der Faktorenanalyse liefert einen zweidimensionalen Präferenzraum, dessen Koordinatenachsen D1 und D2 64 % bzw. 25 % der Gesamtvarianz repräsentieren. Der Präferenzraum ist in Fig. 17 dargestellt. Die Pfeile kennzeichnen die Hörer, die Ziffern die Schallfelder nach Tabelle 3. Der punktierte Pfeil gibt die Konsensusrichtung im Präferenzraum an. Es zeigt sich, daß der erste Faktor die Konsensusrichtung repräsentiert.

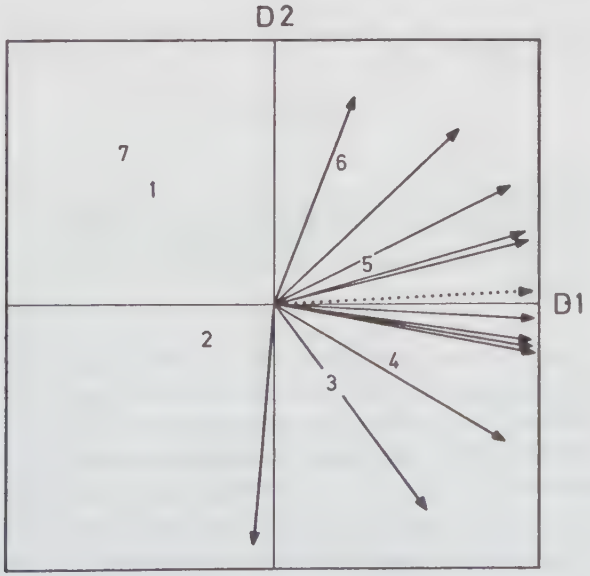

Fig. 17
Hörvergleichsreihe zur Variation des normierten Korrelationskoeffizienten, zweidimensionaler Präferenzraum
(Pfeile: 12 Hörer, Ziffern: 7 Schallfelder)

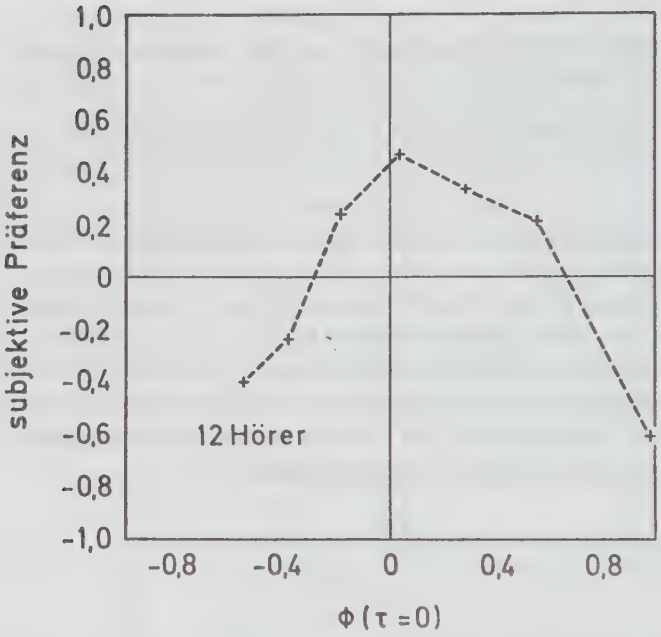

Fig. 18
Zusammenhang zwischen subjektiver Präferenz und normiertem Korrelationskoeffizienten $\Phi(\tau=0)$.

Die Figg. 18 und 19 zeigen die Zusammenhänge zwischen der Präferenzskala und dem normierten Korrelationskoeffizienten $\Phi(\tau=0)$ bzw. dem Spektralparameter S. Wegen der gleichsinnigen systematischen Änderung ähneln sich die Kurvenverläufe. Die Schallfelder mit den Extremwerten der Parameter werden besonders stark abgelehnt. Aus den Abbildungen läßt sich nicht ablesen, auf welche der beiden Größen dies zurückzuführen ist. Aus den Befragungen der Hörer geht jedoch hervor, daß das Schallfeld 7 abgelehnt wird, weil der Korrelationskoeffizient zu groß ist (geringe scheinbare Schallquellenbreite). Das Schallfeld 1 erscheint

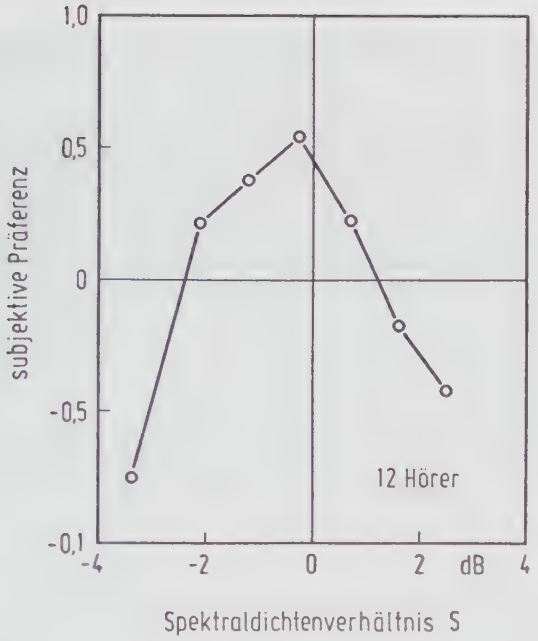

Fig. 19

Zusammenhang zwischen subjektiver Präferenz und dem Spektraldichtenverhältnis S. Da S und $\Phi(\tau=o)$ bei dieser 1. Hörvergleichsreihe gegensinnig monoton voneinander abhängen (vgl. Fig. 16), ist diese Kurve ähnlich einer Spiegelung von Fig. 18.

einigen Hörern wegen des stark negativen Koeffizienten als unnatürlich. Bei den anderen Schallfeldern läßt sich eine solche Zuordnung nicht treffen.

Von einem raumakustischen Parameter wird verlangt, daß er gegen leichte Kopfbewegungen des Hörers invariant ist. Dies trifft für $\Phi(\tau=o)$ nicht zu. Daher soll im folgenden besonders der Korrelationsgrad betrachtet werden.

Da sich die Schallfelder 2 bis 5 bezüglich des Korrelationsgrades K nicht unterscheiden, könnte für sie der Parameter S bei dem Präferenzurteil wichtig sein. Die Beurteilung des Schallfeldes 6 weist jedoch darauf hin, daß die Erhöhung des Korrelationsgrades auf ca. o.6 keinen sehr starken Einfluß auf das Hörerurteil hat. Die von GOTTLOB (1975) gefundene Bevorzugung kleinerer Korrelationsgrade deutet sich nur an.

3.3.3. Hörvergleiche zum Korrelationsgrad (2. Hörreihe)

Die Ergebnisse der in 3.3.2. beschriebenen Hörreihe werden wesentlich durch die übereinstimmende Ablehnung der extremen Schallfelder 1 und 7 (Tabelle 3) beeinflußt. Deshalb wurde eine weitere Hörreihe durchgeführt, in der der Variationsbereich der Parameter verkleinert ist. Die Schallfeldsynthese wird nach den Gleichungen (17) mit analogen Mitteln durchgeführt. Ausgangspunkt ist wiederum die Musikaufnahme aus dem Großen Festspielhaus in Salzburg. In Tabelle 4 sind einige Schallfeldeigenschaften zusammengestellt. 1o Hörer nehmen an den Vergleichen teil. Darunter sind 8 Hörer, die bereits bei der ersten Hörreihe mitwirkten. Die Urteilssicherheit beträgt g = 48 %.

Nr.	$\Phi(\tau = o)$	K	S(dB)
1	-o.12	o.32	o.5
2	-o.o1	o.31	o.o
3	o.14	o.36	-o.2
4	o.3o	o.39	-1.5
5	o.46	o.46	-1.3
6	o.57	o.57	-2.o
7	o.69	o.69	-2.5

Tabelle 4

Werte einiger Schallfeldparameter in der zweiten Hörreihe mit Variation des Korrelationskoeffizienten. Erläuterung s. Tabelle 3.

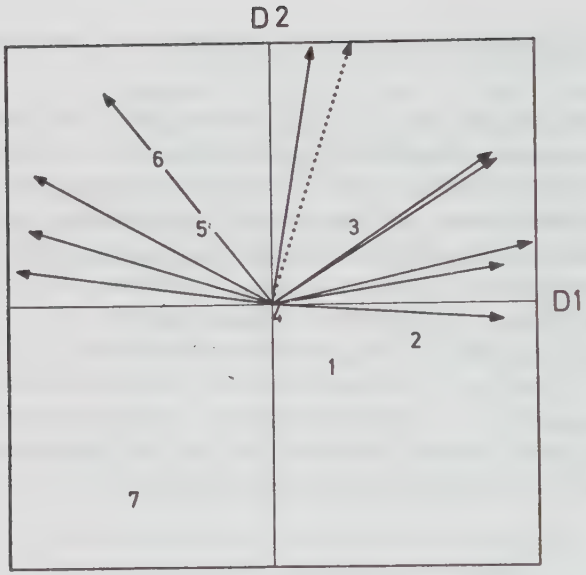

Fig. 2o

Präferenzraum zur 2. Hörreihe mit Variation des normierten Korrelationskoeffizienten. Es bilden sich zwei Urteilsgruppen heraus, die in positive und negative Richtung D1 (Faktor 1) weisen. Infolgedessen zeigt der Konsensusvektor in Richtung D2.

In Fig. 2o ist das Ergebnis der Faktorenanalyse dargestellt. Die Faktoren D1 und D2 repräsentieren 7o % bzw. 17 % der gesamten Varianz. D2 kann in guter Näherung als Konsensus-Faktor angesehen werden. Somit erfassen die gleichsinnigen Urteile der Hörer nur einen Varianzanteil von ca. 17 %. Bezüglich des wichtigsten Beurteilungskriteriums D1 sind die Angaben der Hörer gegensinnig.

Um nicht zu viel Information zu verlieren, ist es daher notwendig, die Hörer in zwei Gruppen aufzuteilen und diese getrennt auszuwerten. Es werden jeweils die Hörer in Gruppen zusammengefaßt, deren Pfeile in Fig. 2o links bzw. rechts von der Konsensusrichtung liegen. In Fig. 21 und 22 ist der Zusammenhang zwischen den Präferenzskalen der Hörergruppen und dem normierten Korrelationskoeffizienten bzw. dem Spektraldichtenverhältnis S dargestellt. Die Kurvenverläufe für die Hörergruppen sind qualitativ gleich, jedoch gegeneinander verschoben.

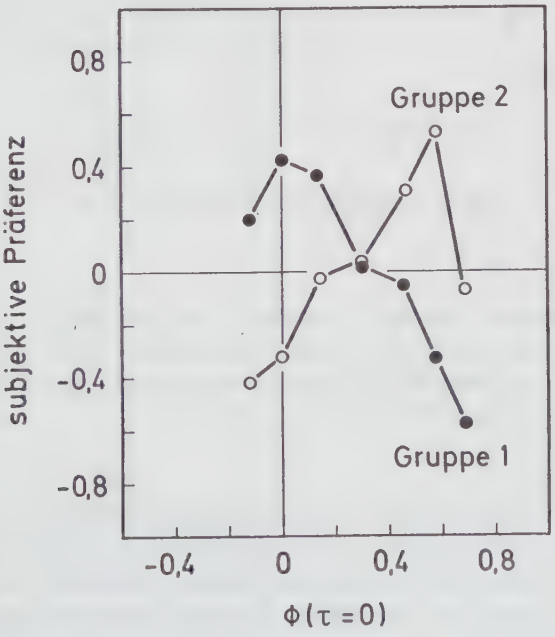

Fig. 21
Zusammenhang zwischen subjektiver Präferenz und dem normierten Korrelationskoeffizienten $\Phi(\tau=0)$ bei der 2. Hörvergleichsreihe. Nach der Faktorenanalyse wurden die Hörer in zwei Urteilsgruppen aufgespalten.

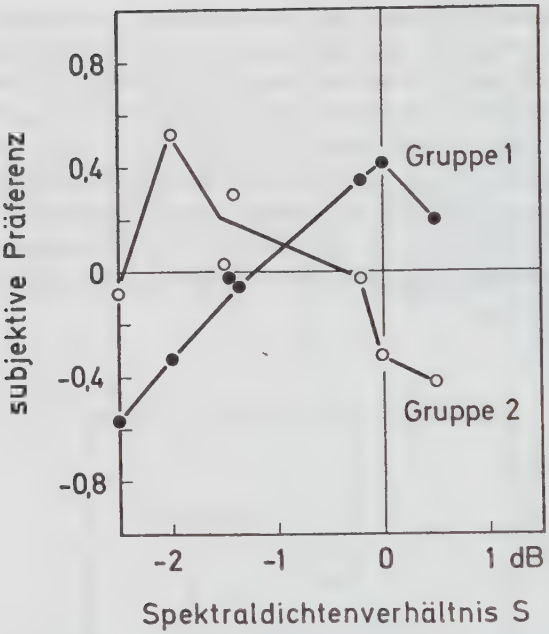

Fig. 22

Zusammenhang zwischen Präferenz und Spektraldichtenverhältnis S bei der 2. Hörreihe. Die Hörer sind anhand der Faktorenanalyse in zwei Gruppen aufgeteilt.

Auch in dieser Hörreihe ist eine Unterscheidung zwischen dem Einfluß der Klangfarbe und des Korrelationsgrades auf die Urteile nicht möglich, da sich beide Parameter monoton ändern. So lassen sich die Beurteilungen innerhalb der Gruppe 1 auf die Bevorzugung niedriger Korrelationsgrade (Fig. 21) bzw. einer helleren Klangfarbe (Fig. 22) zurückführen. Bei den Hörern der zweiten Gruppe tritt eine Ablehnung hoher Korrelationsgrade erst oberhalb von K = o.6 auf, während sie die dunklere Klangfarbe bevorzugen.

Will man die Ergebnisse der beiden Hörreihen vergleichen, muß man die erste unter Auslassung der extremen Schallfelder nach den beiden Hörergruppen auswerten. Fig. 23 zeigt einen Vergleich der Präferenzskalen der Gruppen in Abhängigkeit vom normierten Korrelationskoeffizienten. Die Beurteilungen innerhalb der Gruppen werden in der zweiten Hörreihe gut reproduziert.

Aus beiden Hörreihen kann man schließen, daß eine einhellige Ablehnung hoher Korrelationsgrade erst oberhalb von $K = o.6$ beobachtet wird. Für $K < o.6$ beeinflussen Klangfarbenunterschiede der Schallfelder die Hörerurteile stark. Dabei wird die Klangfarbe nicht einheitlich bewertet. Es treten zwei Hörergruppen auf, die jeweils einen helleren bzw. dunkleren Klang bevorzugen.

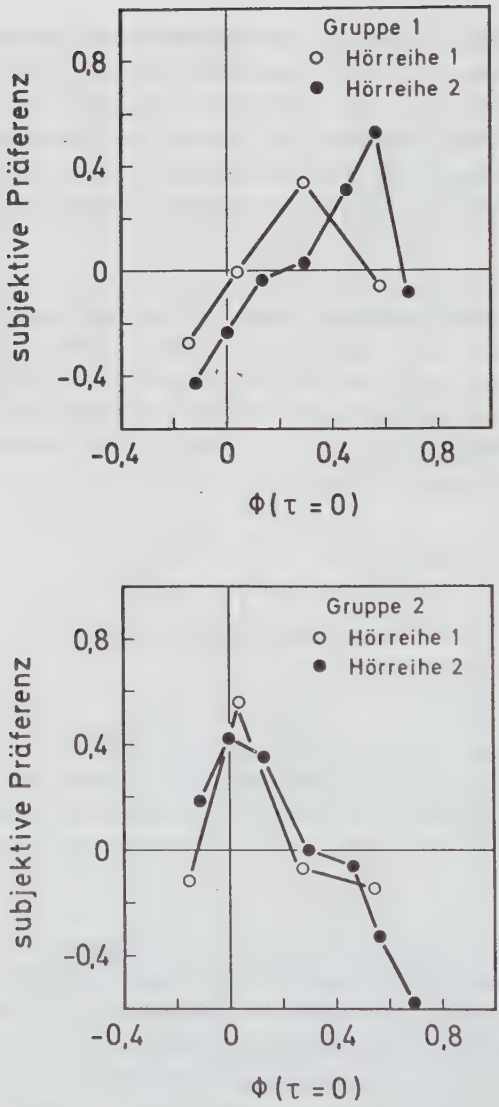

Fig. 23
Vergleich der Ergebnisse aus Hörreihe 1 und 2 für beide Hörergruppen. Die extremen Schallfelder aus Hörreihe 1 sind herausgenommen. Beide Hörreihen stimmen gut überein.

3.3.4. Hörvergleiche zum Korrelationsgrad (3. Hörreihe)

Um den Einfluß des Spektralparameters S möglichst von dem des Korrelationsgrades abzutrennen, wird eine dritte Hörreihe durchgeführt. Die Schallfelder hierzu werden nach der ersten Methode aus Abschnitt 3.3.1. synthetisiert. Hierzu wird eine binaurale Ohrkanalimpulsantwort $h_{L,R}^{(\varphi,\theta)}(t)$ mit $\varphi = 54^{o}$ und $\theta = 0^{o}$ nach der Methode von MEHRGARDT (1976) an einem Kunstkopf aufgenommen. Diese Impulsantwort wird mit einer Länge von 23 ms benutzt, um eine oder mehrere Seitenreflexionen in das gegebene Knallfunken-Echogramm aus dem Festspielhaus Salzburg einzufügen. Durch Faltung mit nachhallfreier Musik werden 7 Schallfelder berechnet, von denen einige Parameter in Tabelle 5 zusammengestellt sind.

Nr.	t_o(ms) links	t_o(ms) rechts	a_o/a_D li.	a_o/a_D re.	T(s)	EDT(s)	Φ(o)	K	S(dB)
1	15	-	o.7	-	1.6	2.o	o.52	o.52	-o.2
2	15	19	o.7	o.6	1.6	1.8	o.34	o.34	-o.3
3	15,41	19	o.7	o.6	1.6	1.8	o.21	o.21	1.2
4	15,41	19,45	o.7	o.6	1.6	1.8	o.15	o.26	o.8
5	12,27, 38	19,4o	o.7	o.6	1.6	1.7	o.o7	o.26	-1.8
6	12,27, 38	13,32, 34	o.7	o.6	1.6	1.7	o.27	o.31	-2.5
7	12,27, 38,57	13,32, 34,46	o.7	o.6	1.6	1.7	o.28	o.28	-3.2

Tabelle 5
Werte einiger Schallfeldparameter bei der 3. Hörreihe

t_o Zeitverzögerung der hinzugefügten Rückwürfe

a_o/a_D Amplitudenverhältnis zwischen erstem eingefügten Rückwurf und dem Direktschall der Impulsantwort

Die übrigen Parameter sind unter Tabelle 1 bzw. 3 erläutert.

Aus Tabelle 5 geht hervor, daß sich erneut fast der gesamte Parametersatz ändert. Für die EDT rührt dies von der fehlenden Korrektur der frühen und späten Energie her, da sämtliche zusätzlichen Seitenreflexionen bei Verzögerungszeiten zwischen 12 und 57 ms eingefügt wurden. Diese tragen nur zur "frühen" Energie bei und verändern somit die "frühe" Nachhallzeit, während die "späte" (klassische) Nachhallzeit unverändert bleibt. Der Korrelationsgrad, der aus den berechneten Aufnahmen bestimmt wird, wird durch die zusätzlichen Rückwürfe nicht sonderlich beeinflußt. Es fällt auf, daß das Spektraldichtenverhältnis S in einem relativ großen Bereich verändert wird. Im Gegensatz zur zweiten Hörreihe (s.S. 43) findet sich hier kein monotoner Zusammenhang zwischen S und K. Es ist nicht ganz klar, wie diese Spektralverfärbungen zustandekommen. Wahrscheinlich beruhen sie auf Interferenzen zwischen den hinzuaddierten Rückwürfen.

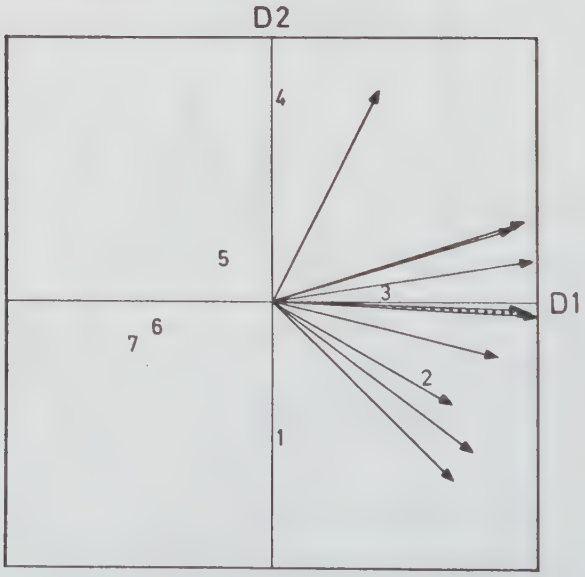

Fig. 24
Präferenzraum zur 3. Hörreihe zum Korrelationsgrad, Projektion auf die Ebene der Faktoren 1 und 2

Diese Schallfelder werden von 1o Hörern in einer vollständigen Paarvergleichsserie nach Präferenz beurteilt. Mit g = 76 % ergibt sich eine hohe Urteilssicherheit.

In der Faktorenanalyse stellt sich heraus, daß der Präferenzraum dreidimensional ist, wobei D1 63 %, D2 16 % und D3 11 % der Gesamtvarianz repräsentieren. Die Ebene der Faktoren 1 und 2 ist in Fig. 24 gezeichnet.

Die Urteile der Hörer stimmen sehr gut überein. Der Konsensusvektor weist in Richtung D1 und vereinigt auf sich eine Varianz von 62 %.

Der Zusammenhang zwischen subjektiver Präferenz und Korrelationsgrad ist in Fig. 25 graphisch dargestellt. Es ergibt

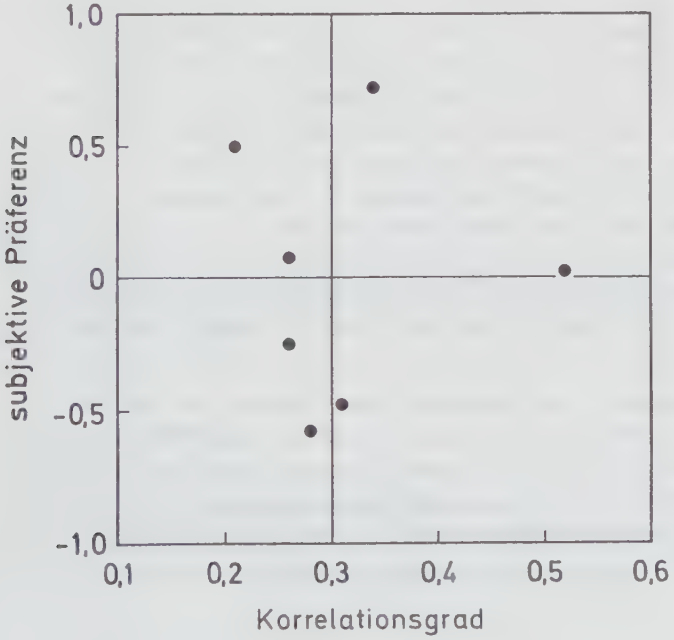

Fig. 25
Zusammenhang zwischen Präferenz und Korrelationsgrad bei der 3. Hörreihe

sich kein einheitliches Bild. Die Ablehnung hoher Korrelationsgrade ist nur tendenziell zu erkennen, während die Schallfelder niedrigerer Korrelation (o.2,..., o.3) teils stark bevorzugt, teils stark abgelehnt werden. Die zunehmende Verbreiterung der Schallquelle über die Lautsprecherbasis hinaus wird nach den Aussagen der Hörer eindeutig erkannt. Einige Hörer bemängeln sogar ein "Auseinanderreißen" der Schallquelle bei den Schallfeldern 6 und 7 nach Tabelle 5. Die Änderung der EDT wird dagegen nicht empfunden.

Auch zwischen dem Spektraldichtenverhältnis S und der subjektiven Präferenz ist keine eindeutige Beziehung zu sehen (Fig. 26). Allerdings treten mit Nr. 1 und 2 zwei Schallfelder auf, die bei gleichem Spektraldichtenverhältnis sehr unterschiedlich beurteilt werden. Dies ist wohl auf den hohen Korrelationsgrad von Nr. 1 zurückzuführen. Diese Beobachtung bestätigt die oben erwähnte Tendenz der Ablehnung zu hoher Korrelationsgrade. Die restlichen Schallfelder werden mit abnehmendem S schlechter beurteilt. Da diese Schallfelder alle einen praktisch gleichen Korrelationsgrad haben, scheint die Ablehnung auf die Abnahme von S zurückzuführen sein. Die Änderung von S in Stufen von o.7 dB reicht zu einer eindeutigen Erkennbarkeit offenbar aus.

Insgesamt liest man aus beiden Kurven ab, daß die Schallfelder mit niedrigem Korrelationsgrad völlig unterschiedlich beurteilt werden, je nach ihrem Spektraldichtenverhältnis. Bei gleichem Korrelationsgrad beeinflussen bereits geringe Änderungen der spektralen Zusammensetzung das Präferenzurteil der Hörer erheblich.

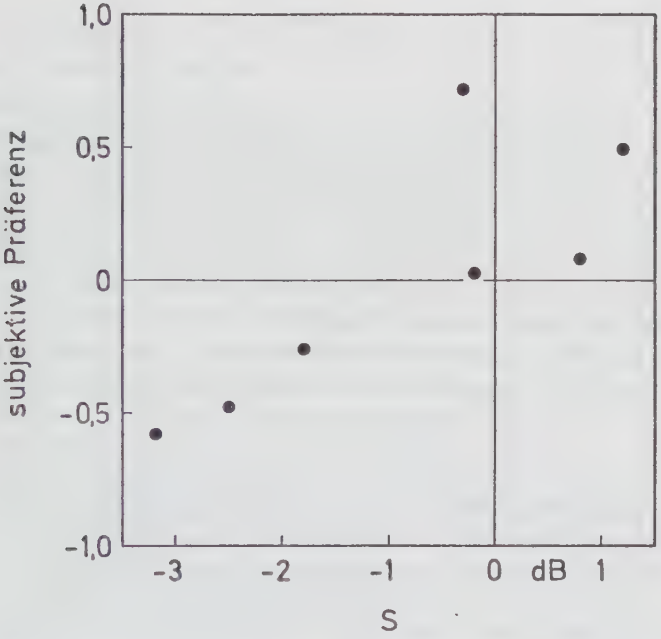

Fig. 26

Zusammenhang zwischen Präferenz und Spektralparameter S bei der 3. Hörreihe zum Korrelationsgrad (7 Schallfelder nach Tabelle 5, 1o Hörer)

4. Diskussion

Im folgenden soll der Versuch unternommen werden, die bislang beschriebenen Einzel-Untersuchungen zu den Parametern unter einheitlichen Gesichtspunkten zusammenzufassen. Vom Standpunkt der Urteilssicherheit lassen sich drei Typen von Hörvergleichsreihen unterscheiden: solche mit extrem niedriger Sicherheit ($g < 25$ %), mit mittlerer ($g < 6o$ %) und hoher ($g > 6o$ %) Urteilssicherheit. Diese Unterteilung steht in Einklang mit Ergebnissen von GOTTLOB (1973), in dessen Hörvergleichsreihen ähnliche Urteilssicherheiten aufgetreten waren.

Die Gruppe 1 umfaßt nur die Hörreihe (vgl. 3.2.2.), in der bei konstanter "early decay time" die Nachhallzeit variiert wurde. Die niedrige Urteilssicherheit, die gleichmäßige Varianzbelegung der Faktoren in der mehrdimensionalen Auswertung sowie die Kommentare der Hörer deuten darauf hin, daß diese Schallfelder nicht sicher unterschieden werden können. Die Nachhallzeitänderungen werden nicht als Urteilskriterium herangezogen. Die klassische Nachhallzeit scheidet damit als subjektiv relevanter Parameter aus, an ihre Stelle tritt zunächst die EDT, die nur den Abfall der Nachhallkurve von O bis auf -1o dB auswertet. Möglicherweise ist für die subjektive Beschreibung ein Parameter noch wichtiger, der das Auswertintervall noch mehr verkürzt (z.B. auf 16o ms; ATAL et al., 1965).

In der Gruppe 2 werden die Hörreihen mit mittlerer Urteilssicherheit zusammengefaßt. Hierzu zählen die Veränderung der EDT (3.2.3.) und die des Korrelationsgrades in einem engen Bereich (3.3.3.). Beiden Hörvergleichsreihen ist zwar die Urteilssicherheit gemeinsam, jedoch urteilen die Hörer beim Korrelationsgrad gegensinnig. Die Versuchspersonen geben an, daß sie den sich ändernden Parameter wohl erkennen. Andererseits nimmt der Parameter keinen ausschlaggebenden Einfluß

auf die Präferenz. Dies liegt daran, daß in beiden Hörreihen der Parameter (EDT bzw. Korrelationsgrad) nur in einem für die Präferenz unkritischen Toleranzintervall variiert wird. Innerhalb dieses Toleranzintervalls genügen selbst kleine (d.h. eben meßbare) spektrale Änderungen, um hohe Bevorzugung eines Schallfeldes in starke Ablehnung umschlagen zu lassen. Liegt ein Parameter in dem Toleranzintervall, so trägt er selbst wenig zur Bildung des Präferenzurteils bei.

Als Gruppe 3 sollen drei Hörreihen betrachtet werden, die alle durch hohe Urteilssicherheit hervorstechen. Es handelt sich hierbei um die Hörreihe zur Lautstärke (3.1.) und die Hörreihen 1 und 3 zum Korrelationsgrad (3.3.2., 3.3.4.). Die hohe Urteilssicherheit ist hier darin begründet, daß das erwähnte Toleranzintervall für die Parameter nicht eingehalten wird. Die Randwerte fallen aus dem Intervall heraus, werden von den Hörern einheitlich abgelehnt und sorgen auf diese Weise für eine hohe Urteilssicherheit und (fast) eindimensionale Beurteilung der Schallfelder.

Die von GOTTLOB et al. (1975) angegebene Ablehnung hoher Korrelationsgrade bestätigt sich hier nur in der Tendenz. Ein Schallfeld wird offenbar abgelehnt, wenn sein Korrelationsgrad höher als o.5 ist. Allerdings kann (bei einem gegebenen Schallfeld) nicht von seinem Korrelationsgrad auf seine Präferenzbeurteilung geschlossen werden, da spektrale Verfärbungen diese u.U. sehr viel stärker beeinflussen können. Läßt man die Schallfelder mit zu hohem Korrelationsgrad aus, so ergeben sich dieselben Resultate wie bei der entsprechenden Hörreihe in Gruppe 2.

Bei der Nachhallzeit fällt auf, daß der subjektive Indifferenzbereich offenbar breiter ist als von GOTTLOB (1973) angegeben. Zwar bleibt die untere Grenze von 1.5 s erhalten, nach oben aber scheint die Toleranz der Hörer doch weiter zu gehen als 2.4 s.

Bei der Lautstärke-Untersuchung tritt ein zusätzlicher Effekt auf. Subjektive Lautstärke ist ein Parameter, der vom

menschlichen Ohr mit hoher Sicherheit erkannt wird. Die hier gewählte Schrittweite von 2 dB(A) liegt deutlich über der absoluten Wahrnehmbarkeitsschwelle. Im Paarvergleich werden die Schallfelder von jedem Hörer sicher nach Lautstärke erkannt und beurteilt, was auch von YAMAGUCHI (1972) beschrieben wird. Jeder Hörer hat seine individuelle Optimal-Lautstärke und beurteilt die Schallfelder gleich gut, die in der Nähe dieses Pegels liegen, während er die leiseren um so mehr ablehnt, je weiter sie von seinem Optimum entfernt sind. Der Zusammenhang zwischen Präferenz und Lautstärke ist bei allen Hörern ähnlich, während das individuelle Optimum in einem Bereich von 8 dB schwankt. Faßt man die Hörer mit ungefähr gleichem Optimum zusammen und überlagert deren Antworten, so ändert die Kurve ihre Gestalt nicht.

Diese Kurvenform scheint für Einzel-Untersuchungen der beschriebenen Art universell zu sein, falls Schallfelder mit extremen Eigenschaften in die Hörreihen einbezogen werden (z.B. ANDO, 1976). Damit wird ein wesentliches Ergebnis dieser Untersuchungen formuliert: eindeutige und gleichsinnige Urteile werden vor allem dann erhalten, wenn in eine Hörreihe Schallfelder aufgenommen werden, die extreme Parameter aufweisen (z.B. sehr kurze Nachhallzeit, negativer Korrelationskoeffizient). Solche Schallfelder treten aber in realen Konzertsälen nicht oder nur selten auf, besitzen also für die raumakustische Anwendung wenig Aussagekraft. Läßt man sie aus den Hörvergleichsreihen heraus, so tritt der eigentlich zu untersuchende Parameter als Entscheidungskriterium in den Hintergrund. Das Präferenzurteil wird dann nach anderen Gesichtspunkten gefällt, die bisher nicht völlig bekannt sind.

Hier spielen spektrale Verzerrungen hinein, für deren meßtechnische Erfassung als vorläufiger Parameter ein Spektraldichtenverhältnis S angegeben wird. Die Definition von S wird nahegelegt durch Auswertung von Kurzzeitspektren der

Ohrsignale, allerdings können hiermit nicht alle auftretenden Urteilsschwankungen erklärt werden. Dies ist wohl darauf zurückzuführen, daß das Ohr besonders im Paarvergleich auf spektrale Verfärbungen empfindlich ist. Außerdem konnten in der vorliegenden Arbeit die anderen Parameter durch die digitale Schallfeldsynthese mit guter Genauigkeit konstant gehalten werden. Die Unterschiede in der spektralen Zusammensetzung wurden so besonders hervorgehoben. Es bleibt abzuwarten, ob dem Parameter S tatsächlich diese entscheidende Rolle zukommt.

5. Zusammenfassung und Schluß

In dieser Arbeit werden subjektive Untersuchungen an Schallfeldern beschrieben, die mit Hilfe eines Digitalrechners samt leistungsfähigem Ein-Ausgabesystem erstellt werden. Diese digitale Schallfeldsynthese bietet gegenüber der herkömmlichen analogen Methode den Vorteil einer realistischen Nachhallstatistik und höheren Rückwurfdichte. Außerdem gibt sie die Möglichkeit an die Hand, einzelne Parameter unter weitgehender Konstanthaltung der übrigen zu variieren.

Folgende Parameter werden in vollständigen Paarvergleichsserien untersucht: 1. die Lautstärke, 2. die klassische Nachhallzeit, 3. die "early decay time", 4. der Korrelationsgrad. Hier zeigen sich folgende Ergebnisse:

1. Im Paarvergleich wird die subjektive Lautstärke von den Hörern als Kriterium bei der Beurteilung der subjektiven Präferenz herangezogen. Jeder Hörer hat seine individuelle Optimal-Lautstärke, die in einem Intervall von etwa 2 dB(A) fixiert ist. Innerhalb dieses Intervalls werden die Schallfelder als etwa gleich gut eingestuft. Liegen sie außerhalb, werden sie um so mehr abgelehnt, je weiter sie davon entfernt sind.

2. Die klassische Nachhallzeit wird bei konstanter Anfangsnachhallzeit (EDT) nicht erkannt. Ein Grund hierfür ist wohl darin zu suchen, daß auf diese Weise etwa 9o % der Energie der Nachhallkurve konstant gehalten werden. Die Hörer orientieren sich vornehmlich am frühen Teil der Nachhallkurve.

3. Die "early decay time" (EDT) ist für die subjektive Präferenz wichtiger als die klassische Nachhallzeit. Es ergibt sich ein Toleranzintervall, unterhalb dessen Schallfelder mit zu kurzer EDT abgelehnt werden. Das Toleranzintervall ist nach oben jedoch breiter als von GOTTLOB (1973) gefunden. Innerhalb des Intervalls treten große Urteilsschwankungen auf, die z.T. auf spektrale Verfärbungen zurückgehen.

4. Der Korrelationsgrad nimmt nur dann Einfluß auf das Präferenzurteil, wenn er einen Wert von etwa o.5 überschreitet. Dies bestätigt nur in der Tendenz das Ergebnis von GOTTLOB et al. (1975). Unterhalb dieses Wertes können spektrale Verfärbungen das Urteil sehr viel mehr beeinflussen als der Korrelationsgrad. Für die Verfärbungen wird aus Kurzzeitspektren ein Parameter S abgeleitet, der das Spektraldichtenverhältnis der Schallfelder oberhalb und unterhalb von 5oo Hz beschreibt.

In allen Hörvergleichsreihen tritt eine einheitliche Kurvenform auf. Die subjektive Präferenz ist hoch innerhalb eines Indifferenzbereichs des jeweiligen Parameters und fällt außerhalb ab. Dies Verhalten zeigt sich jedoch nur, wenn in den Hörreihen Schallfelder mit Parameterwerten enthalten sind, die das Toleranzintervall überschreiten. Liegen alle Schallfelder im Intervall, so hängt die Präferenz von diesem Parameter nicht mehr ab, sondern schwankt in großen Bereichen. Für diese Schwankungen scheinen hauptsächlich Spektralverfärbungen verantwortlich zu sein.

Für ihre meßtechnische Erfassung ist der Spektralparameter S sicherlich noch nicht das beste Maß. In Zukunft wird man wohl einerseits die digitale Schallfeldsynthese, andererseits die Untersuchung des Spektrums verfeinern. Es sollte auf diese Weise möglich sein, auch der subjektiven Klangfarbe ein objektives Maß zuzuordnen.

6. Literaturverzeichnis

ABDEL ALIM, O.

Die Abhängigkeit der Zeit- und Registerdurchsichtigkeit von raumakustischen Parametern bei Musikdarbietung

Dissertation Dresden 1973

ANDO, Y.

Subjektive Beurteilung von Schallfeldern

In: Fortschritte der Akustik (Tagungsband DAGA 1976) VDI Düsseldorf 1976

ATAL, B.S., M.R. SCHROEDER, G.M. SESSLER

Subjective reverberation time and its relation to sound decay

Rep. Int. Congr. Acoust. Liege 1965, G 32

BURGTORF, W., H.P. SERAPHIM

Eine Apparatur zur elektroakustischen Herstellung einfacher Schallfelder in einem reflexionsfreien Raum

Acustica 11 (1961), 92

BURD, A.N.

Nachhallfreie Musik für akustische Modelluntersuchungen

Rundfunktechn. Mitteil. 13 (1969), 2oo

COOLEY, J.W., J.W. TUKEY

An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series

Math. Comput. 19 (1965), 297

COOLEY, J.W., P. LEWIS, P.D. WELCH

Application of the fast Fourier transform to computation of Fourier integrals, Fourier series, and convolution integrals

IEEE Trans. Audio Electroacoust. 15 (1967), 79

CREMER, L.

Statistische Raumakustik

Hirzel, Stuttgart 1961

CREMER, L.

Protokoll zum Raumakustik-Symposion

Berlin 1975

DAMASKE, P.

Subjektive Untersuchungen an Schallfeldern

Acustica 19 (1967/68), 199

DAMASKE, P., V. MELLERT

Ein Verfahren zur richtungstreuen Schallabbildung des oberen Halbraumes über zwei Lautsprecher

Acustica 22 (1969), 153

DAMASKE, P., B. WAGENER

Richtungshörversuche über einen nachgebildeten Kopf

Acustica 21 (1969), 3o

DAMASKE, P.

Richtungsabhängigkeit und Spektrum der an den Ohren empfangenen Signale

Acustica 22 (1969/7o), 2o1

DAMASKE, P.

Head-related two-channel stereophony with loudspeaker reproduction

J. Acoust. Soc. Amer. 5o (1971), 11o9

DAMASKE, P., Y. ANDO

Interaural crosscorrelation for multichannel loudspeaker reproduction

Acustica 27 (1972), 232

EYSHOLDT, U., D. GOTTLOB, K.F. SIEBRASSE, M.R. SCHROEDER

Räumlichkeit und Halligkeit - Untersuchung zur Auffindung korrespondierender objektiver Parameter

In: Fortschritte der Akustik, S. 471
VDI Düsseldorf 1975

GOTTLOB, D.P.A.

Vergleich objektiver akustischer Parameter mit Ergebnissen subjektiver Untersuchungen an Konzertsälen

Dissertation Göttingen 1973

GOTTLOB, D., K.F. SIEBRASSE, M.R. SCHROEDER

Neuere Ergebnisse zur Akustik von Konzertsälen

In: Fortschritte der Akustik, S. 467
VDI Düsseldorf 1975

HELMS, H.D.

Fast Fourier transform method of computing difference equations and simulating filters

IEEE Trans. Audio Electroacoust. 15 (1967), 85

JORDAN, V.L.

Bei der Auswertung von Modellversuchen angewendete Kriterien

Rundfunktechn. Mitteil. 13 (1969), 2o2

KUHL, W.

Räumlichkeit und Halligkeit

13. Akustická Konferencia, S. 97
Bratislava 1975

KUHL, W.

Die "Räumlichkeit" in Konzertsälen als Funktion des Musikschallpegels und des relativen Seitenschallpegels

In: Fortschritte der Akustik (Tagungsband DAGA 1976)
VDI Düsseldorf 1976

KÜRER, R.

Zur Gewinnung von Einzahlkriterien bei Impulsmessungen in der Raumakustik

Acustica 21 (1969), 37o

MEHRGARDT, S.

Messungen der interauralen Übertragungsfunktion und der Trommelfellimpedanz mit dem Impulsmeßverfahren

In: Fortschritte der Akustik (Tagungsband DAGA 1976)
VDI Düsseldorf 1976

MELLERT, V.

Construction of a new dummy head after new measurements of the threshold of hearing

J. Acoust. Soc. Amer. 51 (1972), 1359

MELLERT, V.

Verbesserte Schallfeldabbildung mit einem neuen Kunstkopf

In: Fortschritte der Akustik, S. 433
VDI Düsseldorf 1975

MEYER, E., W. BURGTORF, P. DAMASKE

Eine Apparatur zur elektroakustischen Nachbildung von Schallfeldern

Acustica 15 (1965), 339

PLENGE, G.

Die Sicherheit von Urteilen bei Vergleichen musikalischer Kurzbeispiele

Dissertation TU Berlin 1968

REICHARDT, W.

Vergleich der objektiven raumakustischen Kriterien für Musik

Z. Hochfrequ. El. Akustik 79 (197o), 121

REICHARDT, W., O. ABDEL ALIM, W. SCHMIDT

Abhängigkeit der Grenzen zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit von der Art des Musikmotivs, der Nachhallzeit und der Nachhalleinsatzzeit

Appl. Acoust. 7 (1974), 243

REICHARDT, W., U. LEHMANN

Sind Raumeindruck und Durchsichtigkeit des Hörerlebnisses im Konzertsaal Gegensätze?

Appl. Acoust. 9 (1976), 139

SCHROEDER, M.R.

New method of measuring reverberation time

J. Acoust. Soc. Amer. 37 (1965), 4o9

SCHROEDER, M.R., D. GOTTLOB, K.F. SIEBRASSE

Comparative study of European concert halls

J. Acoust. Soc. Amer. 56 (1975), 1195

SIEBRASSE, K.F.

Vergleichende subjektive Untersuchungen zur Akustik von Konzertsälen

Dissertation Göttingen 1973

SLATER, P.

The analysis of personal preferences

Brit. J. Statist. Psychol. 13 (1960), 119

WAGENER, B.

Räumliche Verteilungen der Hörrichtungen in synthetischen Schallfeldern

Acustica 25 (1971), 203

WILKENS, H.

Kopfbezügliche Stereophonie - ein Hilfsmittel für Vergleich und Beurteilung verschiedener Raumeindrücke

Acustica 26 (1972), 213

WILKENS, H.

Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen

Dissertation TU Berlin 1975

YAMAGUCHI, K.

Multivariate analysis of subjective and physical measures of hall acoustics

J. Acoust. Soc. Amer. 52 (1972), 1271

Herrn Prof. Dr. M.R. Schroeder möchte ich für die Themenstellung zu dieser Arbeit und sein stetes Interesse am Fortgang der Untersuchungen danken, das sich in zahlreichen fördernden Diskussionen ausdrückte.

Den Herren Dr. D. Gottlob, Dipl.Phys. S. Mehrgardt und Dipl.Phys. H. Alrutz danke ich für die vielen wertvollen Diskussionen und die praktische Unterstützung bei der Durchführung der Untersuchungen.

Mein besonderer Dank gilt den Versuchspersonen für deren geduldige Teilnahme an den Hörvergleichen.

L e b e n s l a u f

Ich heiße Ulrich Eysholdt und wurde am 17.2.1949 in Göttingen als erstes Kind des Chirurgen Dr. Karl-Günther Eysholdt und seiner Ehefrau Sigrid, geb. Kößler, geboren. Als ältestes von fünf Kindern wuchs ich in Göttingen auf und besuchte dort vier Jahre die Volksschule, bis wir 1959 nach Bielefeld umzogen, wo mein Vater eine Chefarztstelle bekommen hatte. In Bielefeld ging ich in den altsprachlichen Zweig des Ratsgymnasiums und bestand im Juli 1967 das Abitur. Vom Oktober 1967 bis März 1969 leistete ich meinen Wehrdienst. Im Sommersemester 1969 begann ich, an der Universität Göttingen Physik zu studieren. Im Wintersemester 197o/71 nahm ich zusätzlich das Studium der Medizin auf. Ich absolvierte folgende Zwischenprüfungen: Vordiplom Physik im Februar 1971, Vorphysikum im Juli 1971, Physikum im Juli 1972. Im Dezember 1975 wurde ich nach Ablegung des medizinischen Staatsexamens mit einer pharmakologischen Arbeit zum Doktor der Medizin promoviert.

Im September 1971 trat ich in das Dritte Physikalische Institut der Universität Göttingen ein, wo ich unter der Leitung von Prof. Dr. M.R. Schroeder an einer Computersimulation eines linearen Innenohrmodells arbeitete, die ich im Dezember 1973 mit dem Diplom in Physik abschloß. Seit Januar 1974 arbeite ich unter Prof. Dr. M.R. Schroeder an der vorliegenden Dissertation, die sich mit vergleichenden Untersuchungen an Schallfeldern beschäftigt.